



Spennur í íslensku bergi

Samantekt á bergspennumælingum á Íslandi

Pétur Karl Hemmingsen



Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Háskóli Íslands
2016

SPENNUR Í ÍSLENSKU BERGI

Samantekt á bergspennumælingum á Íslandi

Pétur Karl Hemmingsen

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

Leiðbeinendur
Sigurður Erlingsson
Bjarni Bessason

Prófdómari
Matthías Loftsson

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

Spennur í íslensku bergi. Samantekt á bergspennumælingum á Íslandi.
30 eininga ritgerð sem er hluti af M.Sc. gráðu í byggingarverkfræði.

Höfundarréttur © 2016 Pétur Karl Hemmingsen
Öll réttindi áskilin

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild
Verkfræði- og náttúruvísindasvið
Háskóli Íslands
Hjarðarhagi 2-6
107 Reykjavík

Sími: +354 525 4700

Skráningarupplýsingar:

Pétur Karl Hemmingsen, 2016, Spennur í íslensku bergi, meistararitgerð, Umhverfis- og byggingarverkfræðideild, Háskóli Íslands.

Prentun: Háskólaprent, Fálkagata 2, 107 Reykjavík
Reykjavík, apríl 2016

Útdráttur

Neðanjarðarmannvirki eins og jarðgöng, stöðvarhús, geymslurými ofl. eru nauðsynlegir innviðir margra samfélaga eins og á Íslandi. Við hönnun og byggingu neðanjarðarmannvirkis þarf að hafa þekkingu á spennuástandi bergsins sem vinna á í en hún er m.a. notuð til grundvallar þegar ákvarða á tegundir og magn styrkinga í bergrúmi.

Áreiðanlegustu upplýsingarnar um spennuástand í bergi eru fengnar með bergspennumælingum á viðkomandi stað. Algengustu aðferðir til mælinga á spennum í bergi eru *yfirborun*, *vökvaþrýstipróf* og *plötutjökkun*. Af þessum aðferðum er vökvaþrýstipróf heppilegasta aðferðin í flestum tilfellum.

Nokkrar bergspennumælingar hafa verið gerðar á Íslandi seinustu áratugi og er gerð samantekt á þeim í þessari ritgerð. Í ljós kom að láréttar spennur á Íslandi eru mjög lágar samanborið við það sem gengur og gerist í heiminum, þ.e. k -stuðlar á Íslandi eru mjög lágir. Stærð k -stuðuls eftir dýpi var meðal annars lýst sem falli af formbreytingarstuðli E_h . Formbreytingarstuðull í þeirri líkingu fyrir íslenskar aðstæður var á bilinu $2 \text{ GPa} < E_h < 35 \text{ GPa}$ samanborið við $14 \text{ GPa} < E_h < 170 \text{ GPa}$ á heimsvísu.

Stefna hæstu láréttu spennu σ_H er háð mörgum jarðfræðilegum þáttum og sýndi enga eina tilhneigingu yfir allt landið. Gæði gagnanna um stefnu σ_H voru ekki mikil skv. skilgreiningu *World Stress Map* en það getur átt sér eðlilegar skýringar. Sem dæmi geta jarðfræðilegar aðstæður breyst mjög fljótt eftir staðsetningu og dýpi mælinga.

Abstract

Underground structures such as tunnels, power house caverns, storages etc. are infrastructures of great importance for many societies such as Iceland. During the design and construction period of an underground structure, knowledge of the in situ stress conditions in the rock is needed. E.g. this knowledge is used as a basis for determining the types and amount of reinforcement in an underground structure.

The most reliable information about in situ rock stress conditions are obtained by rock stress measurements at the desired location. The most common methods for in situ stress measurements in rock are *Overcoring*, *Hydraulic Fracturing Test* and *Flatjack Test*. Of these methods the *Hydraulic Fracturing Test* is the most suited one in most cases.

Several stress measurements have been performed in Iceland over the last decades, which will be summed up in this thesis. It turned out that horizontal stresses in Iceland are very low compared to other places in the world, i.e. k -factors in Iceland are very low. The magnitude of the k -factor at a different depth can be described as a function of the deformation modulus E_h . Using that description, the deformation modulus in Icelandic conditions was on the range $2 \text{ GPa} < E_h < 35 \text{ GPa}$ compared to $14 \text{ GPa} < E_h < 170 \text{ GPa}$ worldwide.

The direction of the maximum horizontal stress σ_H in Iceland is dependent on many geological factors and showed no general trend over the whole country. The quality of the data for the direction of σ_H were relatively low according to the *World Stress Map* definition. This can however have a simple explanation e.g. the geological conditions can change rapidly after location and depth of the measurements.

Efnisyfirlit

Myndaskrá	ix
Töfluskrá	xiii
Breytur	xvii
Pakkir	xix
1. Inngangur	1
2. Bergspennur	3
2.1. Mikilvægi þekkingar	3
2.2. Lóðréttar spennur	6
2.3. Láréttar spennur	7
2.4. k-stuðull	8
2.5. Áhrifaþættir á spennuástand í bergi	10
2.5.1. Flekahreyfingar	10
2.5.2. Landslag	11
2.5.3. Rof / Eyðing	12
2.5.4. Sprungur og misgengi	13
2.5.5. Gangar	14
2.6. Yfirlit yfir bergspennur í heiminum	15
3. Jarðfræði Íslands	19
3.1. Myndun og mótun íslensks bergs	19
3.2. Áhrif bergspenna á jarðgangapversnið í íslensku bergi	21
4. Aðferðir til bergspennumælinga	27
4.1. Yfirborun	27
4.1.1. Tvívíð yfirborun	28
4.1.2. Þrívíð yfirborun	31
4.2. Vökvaþrýstipróf	35
4.2.1. Kirsch jöfnur	35
4.2.2. Spennuútreikningar	37
4.3. Plötutjökkun	39
4.4. Samanburður á aðferðum	41

5. Bergspennur á Íslandi	43
5.1. Niðurstöður mælinga	44
5.1.1. Búrfell	45
5.1.2. Reykjavík	47
5.1.3. Blönduvirkjun	50
5.1.4. Reyðarfjörður	52
5.1.5. Sandafell	54
5.1.6. Teigsbjarg	56
5.1.7. Kárahnjúkar	62
5.1.8. Fáskrúðsfjarðargöng	65
5.1.9. Aðrir staðir	69
6. Samantekt og greining	71
6.1. Láréttar spennur	71
6.2. k -stuðull	74
6.3. Formbreytingarstuðull	75
6.4. Stefna σ_H	78
7. Lokaorð	81
Heimildir	83
A. Mælingar Haimson&Rummel í Reyðarfirði, 1981 - sýnishorn	87
B. Mælingar SINTEF í Fáskrúðsfjarðargöngum, 2005 - sýnishorn	91
C. Mælingar Nils Hast í Búrfellsvirkjun, 1967 - sýnishorn	97
D. Teigsbjarg - þversnið af borholum	103
E. Mælingar Amberg á Kárahnjúkum	105
F. Bergbrot (e. spalling) í Fljótsdalsstöð	107

Myndaskrá

2.1. Áhrif hárra bergspenna á berg umhverfis bergrúm	3
2.2. Munur á lítt skaðlegu bergbroti til mjög skaðlegs bergslags	5
2.3. Áhrif hárra spenna í veiku og sterku bergi	5
2.4. Mismunandi gerðir bergslags	5
2.5. Lóðréttar bergspennumælingar á heimsvísu	6
2.6. Streitur í bergsýni	7
2.7. k -stuðlar á heimsvísu og skv. líkingu Sheorey	8
2.8. Ýmsar tegundir flekahreyfinga og lega flekaskila gegnum Ísland	10
2.9. Áhrif landslags á láréttar spennur	11
2.10. Áhrif mismunandi yfirborðs á spennudreifingu	11
2.11. Tröllaskagi á Norðurlandi	12
2.12. Misgengi í bergi	13
2.13. Skýringarmyndir á lag- og berggöngum	14
2.14. Berggangur við Reykjanestá	14
2.15. Lóðréttar bergspennumælingar og k -stuðlar á heimsvísu	15
2.16. Stefnur σ_H í N-Ameríku	16
2.17. Stefnur σ_H í Evrópu	17
2.18. Stefnur σ_H á heimsvísu	18

MYNDASKRÁ

3.1. Jarðfræðikort af Íslandi	20
3.2. Jarðlagaskipan af tveimur tölvulíkönum	22
3.3. Brotsvæði umhverfis gangaþversnið þegar $k=0,4$	23
3.4. Brotsvæði umhverfis gangaþversnið þegar $k=1,0$	23
3.5. Brotsvæði umhverfis gangaþversnið þegar $k=2,0$	23
3.6. Bergfærslur í stöðvarhúshelli Blönduvirkjunar	24
3.7. Bergfærslumælar í stöðvarhúshelli Fljótsdalsstöðvar	25
3.8. Bergfærslur í stöðvarhúshelli Fljótsdalsstöðvar	25
3.9. Planmynd af jarðgöngum og láréttar spennur	26
4.1. Hefðbundin skref í 2D yfirborunaraðferð	28
4.2. Streitumælir / rósetta	29
4.3. Hefðbundin skref í 3D yfirborunaraðferð	31
4.4. Mælitæki fyrir 3D yfirborun	32
4.5. Dæmi um streitumælingar úr 3D yfirborun	32
4.6. Uppsetning búnaðar við framkvæmd vökvaþrýstiprófs	35
4.7. Radial-, tangential- og skúfspennur í hringlaga opi	36
4.8. Ferlið í vökvaþrýstiprófi	37
4.9. Sprungumyndun og láréttar höfuðspennur	38
4.10. Uppsetning plötutjökkunarprófs	39
4.11. Elastísk og plastísk svæði umhverfis bergrúm	40
4.12. Plötur í plötutjökkunarprófi	40
5.1. Staðsetningar bergspennumælinga á Íslandi	43

5.2. Langsnið jarðganga í Búrfellsvirkjun	45
5.3. Niðurstöður 3D yfirborunar í Búrfellsvirkjun	46
5.4. Stefnur σ_H í holu Mp 3 í Búrfellsvirkjun	46
5.5. Niðurstöður vökvaprýstiprófs í Reykjavík	48
5.6. Stefnur σ_H í Reykjavík	49
5.7. Niðurstöður vökvaprýstiprófs við Blönduvirkjun	50
5.8. Stefnur σ_H við Blönduvirkjun	51
5.9. Niðurstöður vökvaprýstiprófs í Reyðarfirði	53
5.10. Stefnur σ_H í Reyðarfirði	53
5.11. Niðurstöður vökvaprýstiprófs í Sandafelli	55
5.12. Stefnur σ_H í Sandafelli	55
5.13. Niðurstöður vökvaprýstiprófs í Teigsbjargi, holu FV-1	57
5.14. Stefnur σ_H í Teigsbjargi, holu FV-1	57
5.15. Niðurstöður vökvaprýstiprófs í Teigsbjargi, holu FV-40	59
5.16. Stefnur σ_H í Teigsbjargi, holu FV-40	59
5.17. Staðsetningar yfirborunarmælinga í Fljótsdalsstöð	61
5.18. Niðurstöður vökvaprýstiprófs við Kárahnjúka	63
5.19. Stefnur σ_H við Kárahnjúka	64
5.20. Staðsetning borhola í Fáskrúðsfjarðargöngum	65
5.21. Niðurstöður 3D yfirborunar í Fáskrúðsfjarðargöngum	67
5.22. Stefna σ_H í Fáskrúðsfjarðargöngum	67
6.1. Láréttar spennur á Íslandi	71
6.2. Láréttar spennur sem fall af hæð yfir sjávarmáli	73

MYNDASKRÁ

6.3. Íslenskir k -stuðlar ásamt neðri og efri mörkum k -stuðla á heimsvísu skilgreindum af Hoek og Brown	74
6.4. Íslenskir k -stuðlar ásamt neðri og efri mörkum þeirra	75
6.5. Íslenskir k -stuðlar með viðeigandi neðri og efri mörkum E_h	76
6.6. Stefnur σ_H á Íslandi	79

Töfluskrá

2.1. Gæði gagna um stefnu σ_H skv. skilgreiningu WSM	16
2.2. Gæði bergspennumælinga í N-Ameríku og Evrópu	17
3.1. Inntaksstærðir valinna bergtegunda	22
3.2. Hoek-Brown stuðlar valinna bergtegunda	22
3.3. Staðbundnar spennur á 500 m dýpi	22
4.1. Stefnur streitunema í 3D yfirborun	34
5.1. Staðir þar sem bergspennur hafa verið mældar á Íslandi	44
5.2. Dýpi og tegund yfirborunarmælinga í Búrfellsvirkjun	45
5.3. Niðurstöður 3D yfirborunar í Búrfellsvirkjun	45
5.4. Línuleg nálgun á láréttum spennum og meðalstefna í Búrfellsvirkjun, holu Mp 3	47
5.5. Niðurstöður 2D yfirborunar í Búrfellsvirkjun	47
5.6. Niðurstöður vökvaþrýstiprófs í Reykjavík	48
5.7. Línuleg nálgun á láréttum spennum og meðalstefna í Reykjavík	49
5.8. Niðurstöður vökvaþrýstiprófs við Blönduvirkjun	50
5.9. Línuleg nálgun á láréttum spennum og meðalstefna við Blönduvirkjun	51
5.10. Niðurstöður vökvaþrýstiprófs í Reyðarfirði	52
5.11. Línuleg nálgun á láréttum spennum og meðalstefna í Reyðarfirði	54

5.12. Niðurstöður vökvaprýstiprófs í Sandafelli	54
5.13. Línuleg nálgun á láréttum spennum og meðalstefna í Sandafelli	56
5.14. Niðurstöður vökvaprýstiprófs í Teigsbjargi, holu FV-1	56
5.15. Línuleg nálgun á láréttum spennum og meðalstefna í Teigsbjargi, holu FV-1	58
5.16. Niðurstöður vökvaprýstiprófs í Teigsbjargi, holu FV-40	58
5.17. Línuleg nálgun á láréttum spennum og meðalstefna í Teigsbjargi, holu FV40	60
5.18. Dýpi og tegund yfirborunarmælinga í Fljótsdalsstöð	60
5.19. Niðurstöður 3D yfirborunar í Fljótsdalsstöð	61
5.20. Niðurstöður 2D yfirborunar í Fljótsdalsstöð	62
5.21. Upplýsingar um borholur við Kárahnjúka	62
5.22. Fjarlægðir milli borhola við Kárahnjúka	63
5.23. Niðurstöður vökvaprýstiprófs við Kárahnjúka	63
5.24. Línuleg nálgun á láréttum spennum og meðalstefna við Kárahnjúka	64
5.25. Dýpi og tegund yfirborunarmælinga í Fáskrúðsfjarðargöngum	65
5.26. Niðurstöður 3D yfirborunar í Fáskrúðsfjarðargöngum, borholu nr. 1	66
5.27. Niðurstöður 3D yfirborunar í Fáskrúðsfjarðargöngum, borholu nr. 3	66
5.28. Niðurstöður 2D yfirborunar í Fáskrúðsfjarðargöngum	68
5.29. Niðurstöður bergspennumælinga frá nokkrum stöðum á Íslandi	69
6.1. Línuleg nálgun á láréttum spennum á Íslandi	72
6.2. Línuleg nálgun á láréttum spennum sem fall af hæð yfir sjávarmáli	73
6.3. E_h reiknað út frá Q -gildi	76
6.4. E_h reiknað út frá E_i og GSI	77
6.5. Samanburður á E_h gildum	77

6.6. Meðalstefna σ_H á nokkrum stöðum á Íslandi	78
6.7. Skipting gæða á bergspennumælingum á Íslandi	78

Breytur

σ_v	Lóðrétt spenna
σ_{hor}	Lárétt spenna
σ_H	Hæsta lárétta spenna
σ_h	Lægsta lárétta spenna
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Höfuðspennur
σ_{ci}	Einása brotstyrkur einsleits bergsýnis
σ_n	Normalspenna þvert á bergrúm
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Spennur í staðbundnu hnitakerfi
σ_θ	Tangential spenna í hringlaga holu/bergrúmi
σ_r	Radial spenna í hringlaga holu/bergrúmi
$\tau_{r\theta}$	Skúfspenna í hringlaga holu/bergrúmi
σ_X	Lárétt spenna í 2D yfirborun
$\overline{\sigma_h}$	Meðaltal σ_h og σ_H
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	Skúfspennur í staðbundnu hnitakerfi
ε_{lat}	Hliðarstreita
ε_{ax}	Áslæg streita
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	Höfuðstreitur
$\varepsilon_A, \varepsilon_B, \varepsilon_C$	Mældar streitur í 2D yfirborun
ε_{ij}	Mældar streitur í 3D yfirborun
A	Stuðlar sem taka tillit til E , ν og stefnu rósettu og streitunema
γ	Rúmþyngd
z	Dýpi frá yfirborði
h	Hæð yfir sjávarmáli
ν	Poisson's hlutfall
E	Fjæðurstuðull
E_h	Formbreytingarstuðull
E_i	Fjæðurstuðull einsleits bergsýnis
k	Hlutfall milli og láréttra og lóðréttra spenna
k_n	k -hlutfall þvert á bergrúm
k_{min}	Hlutfall milli σ_h og σ_v
k_{max}	Hlutfall milli σ_H og σ_v
m_b, s, a	Efnisstuðlar sem ráðast af bergtegund og heilleika bergs
m_i	Efnisstuðull sem ræðst af eiginleikum ósprungins bergs
Q	Gæðastuðull bergs m.t.t. jarðgangagerðar

TÖFLUSKRÁ

RQD	Lengdarhlutfall kjarnabrota $> 10cm$
J_n	Fjöldi sprungukerfa
J_r	Lögun og áferð sprunguflata
J_a	Gerð og þykkt sprungufyllinga
J_w	Vatn í sprungum
SRF	Lækkunarstuðull á spennuástand
GSI	Stuðull sem ræðst af sprunguástandi og bergtegund
MR	Margföldunarstuðull fyrir bergtegundir
D	Skemmdarstuðull bergs
a	Radíus hringlaga holu
r	Fjarlægð frá miðju hringlaga holu
P_c	Vökvaprýstingur við myndun sprungu
P_r	Vökvaprýstingur við enduropnun sprungu
P_{si}	Innskotsprýstingur
T	Togstyrkur
u	Vatnsprýstingur

Þakkir

Þakkir færi ég öllum þeim sem hafa stutt mig við vinnu þessa verkefnis og í gegnum mitt háskólanám. Sérstakar þakkir fá eftirtaldir aðilar:

Leiðbeinandi minn Sigurður Erlingsson prófessor við Háskóla Íslands fyrir góða leiðsögn, hvatningu og stuðning við vinnslu verkefnisins.

Meðleiðbeinandi minn Bjarni Bessason prófessor við Háskóla Íslands fyrir góða leiðsögn og gagnlegar ábendingar við yfirferð verkefnisins.

Birgir Jónsson dósent við Háskóla Íslands fyrir aðstoð við öflun heimilda og áhugann sem hann sýndi verkefninu.

Matthías Loftsson og Atli Karl Ingimarsson hjá verkfræðistofunni Mannvit, Ægir Jóhannsson hjá verkfræðistofunni Verkís og Hrafnhildur Tryggvadóttir hjá Landsvirkjun fyrir aðstoð við öflun gagna.

Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar fyrir veitingu styrks í tengslum við gerð verkefnisins.

Samnemendur mínir Vignir Val Steinarsson og Ásmundur Þrastarson fyrir tæknilega aðstoð og góðar og uppbyggilegar umræður um verkefnið.

Umhverfis- og byggingarverkfræðideild Háskóla Íslands fyrir að útvega mér góða vinnu-aðstöðu við gerð verkefnisins.

Að lokum vil ég þakka fjölskyldu minni fyrir allan stuðninginn sem þau hafa veitt mér í gegnum háskólanámið.

1. Inngangur

Neðanjarðarmannvirki eru einn af nauðsynlegum innviðum margra samfélaga. Algengustu neðanjarðarmannvirki á Íslandi eru jarðgöng í þjóðvegakerfinu og í vatnsaflsvirkjunum auk stöðvarhúshella vatnsaflsvirkjana. Erlendis eru neðanjarðarmannvirki einnig gerð fyrir námuvinnslu, járnbrautaleiðir, geymslurými, íþróttamannvirki og margt fleira.

Elstu jarðgöngin í íslenska þjóðvegakerfinu eru í gegnum Arnardalshamar milli Ísafjarðar og Súðavíkur, en þau eru 30 m löng og voru opnuð árið 1948. Samanlögð lengd jarðganga í þjóðvegakerfinu eru 43,4 km og eru göngin undir Breiðdals- og Botnsheiði á Vestfjörðum lengst eða 9,1 km (*Vegagerðin*, 2015).

Jarðgöng í vatnsaflsvirkjunum á Íslandi samanstanda fyrst og fremst af aðrennslis- og frárennslisgöngum en einnig aðkomugöngum, hjáveitugöngum o.fl. Samanlögð lengd jarðganga tengdum vatnsaflsvirkjunum á Íslandi er 85,1 km og þar af eru göng tengd Kárahnjúkavirkjun 72,3 km eða um 85% (Landsvirkjun, 2016).

Jarðgöng á Íslandi hafa að mestu leyti verið gerð með hefðbundinni D&B aðferð (*e. Drill and Blast*). Þá eru boraðar holur, þær fylltar af sprengiefni og færa (salvi) síðan sprengd. Algeng framvinda með slíkri aðferð geta verið um 5-10 m á sólarhring. Önnur aðferð er að heilbora með TBM bor (*e. Tunnel Boring Machine*). Þá er þvermál borsins það sama og þvermál gangnanna á að vera. Framvinda með heilborunaraðferð er mun meiri en með hefðbundinni D&B aðferð, en henni fylgir gríðarlegur stofnkostnaður og einnig er undirbúningsvinna áður en borun getur hafist mjög tímafrek. Því þykir einungis æskilegt að nota TBM bor ef göng eiga að vera lengri en 10-15 km. Einu heilboruðu jarðgöng á Íslandi eru aðrennslisgöng Kárahnjúkavirkjunar sem eru um 40 km löng, önnur gangamannvirki Kárahnjúkavirkjunar voru gerð með D&B aðferð.

Einn þeirra þátta sem nauðsynlegt er að hafa þekkingu á við hönnun og byggingu neðanjarðarmannvirkja eru spennur í berginu. Þeim má lýsa sem þrýstingi sem myndast vegna þunga bergsins en einnig vegna jarðfræðilegra þátta eins og flekahreyfinga o.fl. Þekking á spennuástandi umhverfis bergrúm er notuð til grundvallar þegar ákvarða á stærð og stefnu bergrúms og magn og tegundir styrkinga í bergrúmi. Einnig skipta máli þættir eins og berggæði, sprungustefnur, jarðlagahalli og hallastefna (Birgir Jónsson, 1984) en ekki verður farið djúpt í þá þætti í þessari ritgerð.

Áreiðanlegustu upplýsingar um spennuástand í bergi eru fengnar með mælingum. Í þessu riti verða kynntar helstu aðferðir sem notaðar eru til bergspennumælinga en það eru *yfirborun*, *vökvaþrýstipróf* og *plötutjökkun*. Bergspennur hafa verið mældar á nokkrum

1. Inngangur

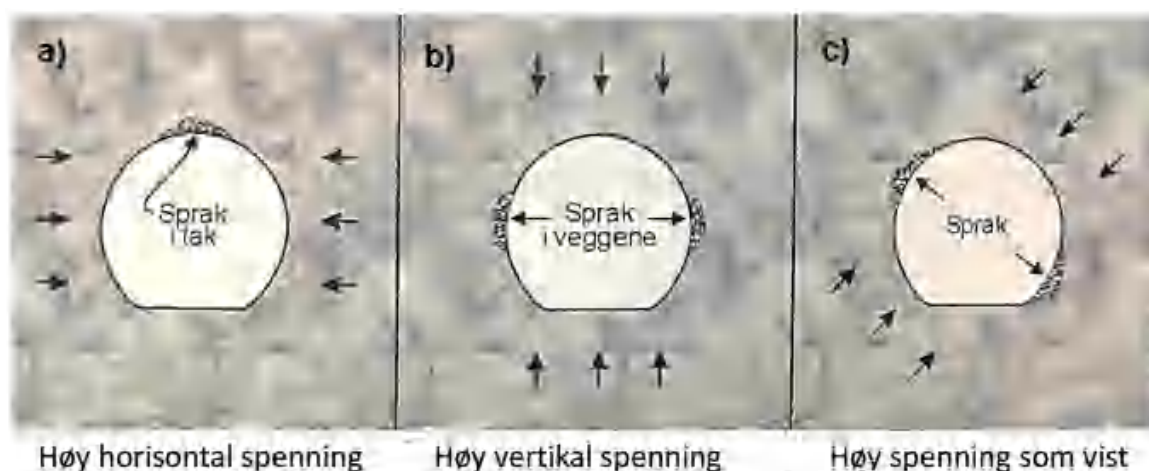
stöðum víðs vegar um landið seinustu áratugi og hefur meðal annars verið fjallað stuttlega um nokkrar þeirra í greinum eftir Atla Karl Ingimarsson, Matthías Loftsson og Ægi Jóhannsson (2006) annars vegar og Atla Karl Ingimarsson og Bezalel Haimson (2007) hins vegar. Markmiðið með þessu verkefni er að fjalla um bergspennumælingar á Íslandi, safna saman helstu upplýsingum um þær og hafa þær aðgengilegar á einum stað.

Rýnt verður í mælingarnar og reynt að sjá megin einkenni spennuástands í íslensku bergi. Framkvæmd bergspennumælinga er fremur dýr og hafa þær ekki verið gerðar í tengslum við margar neðanjarðarframkvæmdir á Íslandi í gegnum tíðina. Telja má líklegt að sú staða muni lítið breytast í náginni framtíð. Samantekt sem þessi gæti því nýst sem gagnleg heimild þegar meta á spennuástand í bergi vegna jarðgangaframkvæmda á Íslandi í framtíðinni. Það skal þó tekið skýrt fram að þessu riti er ekki ætlað að koma í stað frekari bergspennumælinga sem gefa sem fyrr alltaf áreiðanlegastar upplýsingar um spennuástand í bergi.

2. Bergspennur

2.1. Mikilvægi þekkingar

Við mannvirkjagerð í bergi, þ.e. við gerð jarðganga og annarra neðanjarðarmannvirkja, er mikilvægt að þekkja staðbundnar spennur í berginu, þ.e. hversu miklar þær eru, í hvaða stefnu verka höfuðspennurnar og þ.a.l. hvar bergið er líklegast til að brotna. Meta þarf hvaða afleiðingar bergspennur geta haft sem æskilegt er að koma í veg fyrir (Hudson & Harrison, 2002). Óstöðugleiki í bergrúminu þarf ekki einungis að orsakast af háum spennum því lágar spennur geta einnig minnkað stöðugleika bergs ef það er mjög sprungið fyrir, þá vegna lágra normalspenna á sprungur sem annars myndu þrýsta berginu saman (Palmström & Stille, 2015). Mynd 2.1 sýnir dæmi um hvernig spennur geta haft áhrif á bergrúm.



Mynd 2.1: Dæmi um hvernig háar bergspennur hafa áhrif á bergið umhverfis bergrúm. Örvar á mynd tákna a) háar láréttar spennur, b) háar lóðréttar spennur og c) háar skástæðar spennur. Í öllum tilfellum tákna örvarnar spennuástand áður en gangagröftur hefst (Hagen, 2015).

Í stórum neðanjarðarhvelvingum eins og stöðvarhúshellum er þekking á staðbundnum spennum nauðsynleg. Við hönnun á stöðvarhúshellum og öðrum neðanjarðarmannvirkjum gefur þekking á spennuástandi bergsins forsendur til að ákvarða eftirfarandi (Haimson, 1977):

2. Bergspennur

- Hentugustu stefnu lengdaráss bergrúms. T.d. við hönnun stöðvarhúshellis er mælt með að lengdarásinn snúi í sömu átt og hæsta lárétta spennan til að lágmarka skemmdir í berginu umhverfis þversniðið.
- Besta lögum og stærð bergrúms. Bergrúmið þarf þó alltaf að vera þannig að það rúmi þann búnað og starfsemi sem mannvirkni á að hýsa.

Þekking á spennuástandi og jarðfræði, á þeim stað sem til stendur að reisa neðanjarðarmannvirki, gerir það kleift að setja upp tölvulíkan af jarðgangapþversniði og berginu í kring og líkja þannig eftir raunverulegum aðstæðum. Í hönnunarfasanum má þannig t.d. meta á nokkuð áreiðanlegan hátt stöðugleika, bergfærslur og styrkingarþörf bergrúmsins sem þannig getur minnkað óvissu í tíma- og kostnaðaráætlunum fyrir byggingu mannvirkisins.

Í jarðgöngum þar sem vatn mun renna í gegn, s.s. aðrennslis- og frárennslisgöng vatnsaflsvirkjana og önnur vatnsmiðlunargöng, skiptir máli að bergið í göngunum þoli þann þrýsting sem vatnsrennslid veldur. Með öðrum orðum þá þarf minnsta höfuðspenna bergsins að vera hærri en vatnsþrýstingurinn sem verður á berginu. Hægt er að ganga úr skugga um þetta með því að mæla spennurnar í berginu. Gefi niðurstöður mælinganna það hins vegar til kynna að vatnsþrýstingurinn sé hærri en minnsta höfuðspenna bergsins þarf að gera ráðstafanir til að styrkja gangayfirborðið, t.d. með stálfóðringu. Í norska námuiðnaðinum áttuðu menn sig snemma á því að mælingar á staðbundnum bergspennum hefði ýmsa kosti í för með sér. Niðurstöður mælinganna eru í flestum tilfellum áreiðanlegar og í sumum tilfellum gefa þær til kynna að bergstödir (*e. pillars*) á milli bergrúma geti verið minni en upphaflega áætlað. Það þýðir að hægt er að grafa út og vinna meira málmgrýti af minna svæði (Dahle & Larsen, 2005).

Almennt aukast staðbundnar spennur (*e. in situ stresses*) með dýpi. Það veldur því að við jarðgangagerð á miklu dýpi þarf að fást við yfirspennt berg. Í veiku bergi myndi það koma fram í miklum bergfærslum (*e. squeezing*) þegar bergrúm er myndað og í harðara bergi myndu líkur á bergbroti (*e. spalling*) aukast. Hugtakið „squeezing” felur í sér minnkun á þversniði jarðganga sem á sér stað strax eftir útgröft og getur átt sér stað í nokkurn tíma. Í veiku bergi þar sem styrkingar eru ekki settar upp strax þá munu miklar færslur eiga sér stað og spennurnar umhverfis bergrúmið endurdreifast. Ljósmyndin til vinstri á mynd 2.3 sýnir dæmi um miklar bergfærslur í *Saint Martin La Porte* göngunum í Sviss. Þegar bergfærslur eru að mestu leyti stöðvaðar er byrjað að grafa að nýju til að komast aftur í upprunalegt snið og því næst settar upp styrkingar til að hindra frekari færslur (Barla o.fl., 2010). Í bergbroti losna „flögur” úr veggjum og/eda þaki ganganna og getur það átt sér stað í nokkurn tíma. Almennt á bergbroti sér stað nálægt stafni ganga og sjaldan í meiri fjarlægð en sem nemur einu þvermáli ganganna. Trefjastyrkt sprautusteypa og grautaðir bergboltar duga oft sem næg vörn gegn bergbroti sem þessu. Öfgafyllra en þó raunverulegt dæmi er svokallað bergslag (*e. rockburst*). Því má lýsa sem skyndilegu hruni og oft miklu broti úr veggjum jarðganga vegna yfirspennts bergs og hraðri losun uppsafnaðrar orku við jarðskjálfta (Diederichs, 2014). Ljósmyndin til hægri á mynd 2.3 sýnir dæmi um bergslag í djúpri námu í Suður Afríku. Á Íslandi er bergslag ekki þekkt vandamál en í djúpum námum erlendis er þetta töluverð áskorun að fást við. Þekking á spennuástandi umhverfis bergrúm, sem m.a. er aflað með mælingum, getur því skapað

2.1. Mikilvægi þekkingar

svigrúm til að gera viðeigandi ráðstafanir eins og að auka magn eða breyta tegundum bergstyrkinga og koma þannig í veg fyrir skaðleg áhrif af ofangreindum atburðum, eða að minnsta kosti minnka þau. Einfaldar skýringarmyndir á bergbroti og bergslagi má sjá á myndum 2.2 og 2.4. Myndir af bergbroti úr Fljótsdalsstöð má finna í viðauka F.



Mynd 2.2: Einfaldar skýringarmyndir sem sýna allt frá lítt skaðlegu bergbroti (a) til mjög skaðlegs bergslags (d), séð frá vinstri til hægri (Diederichs, 2014).



Mynd 2.3: Dæmi um áhrif hárra bergspenna á neðanjarðarmannvirki.

T.v.: Saint Martin La Porte göngin í Sviss. Þau eru í veiku bergi þar sem hátt spennuástand hefur valdið miklum færslum. Endurgrafa þarf til að ná upprunalegu sniði og styrkingar svo settar upp að því loknu (Barla o.fl., 2010).

T.h.: Jarðgöng í hörðu bergi í djúpri gullnámu í Suður Afríku. Bergslag átti sér stað vegna jarðskjálfta og mjög hás spennuástands sem fyrir var í berginu (Durrheim, 2010).



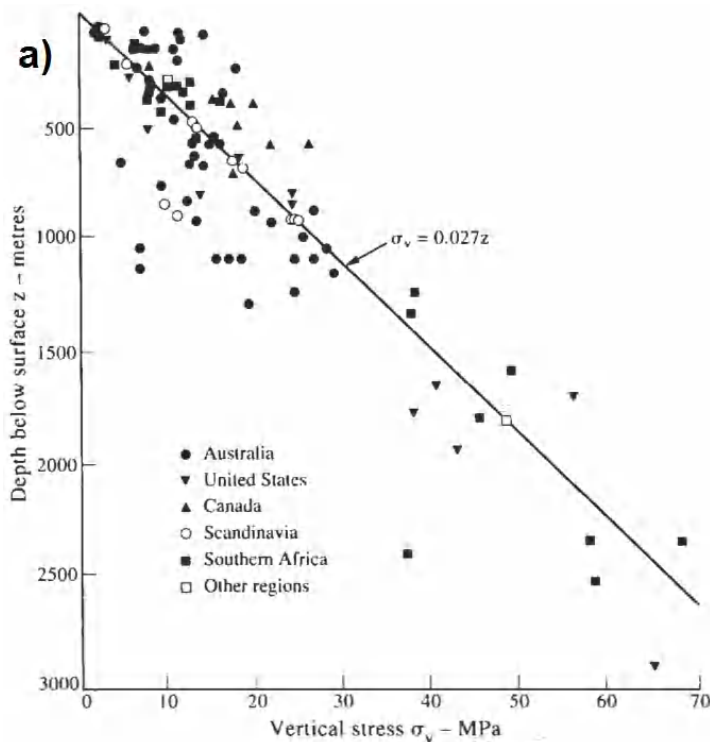
Mynd 2.4: Mismunandi gerðir bergslags (Kaiser o.fl., 1996).

2.2. Lóðréttar spennur

Einföld nálgun á lóðréttum spennum í bergi er að þær ákvarðast af þyngd bergsins ofan við staðinn og aukast þannig línulega eftir því sem dýpið eykst.

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad (2.1)$$

þar sem σ_v er lóðrétt spenna, γ er rúmþyngd bergs og z er dýpi frá yfirborði. Mynd 2.5 sýnir niðurstöður mælinga á lóðréttum spennum á nokkrum svæðum í heiminum.



Mynd 2.5: Mældar lóðréttar bergspennur á heimsvísu (Hudson & Harrison, 2002).

Almennt er miðað við rúmþyngd bergs sem $\gamma = 0,027^{MN}/m^3$ en þar er um meðaltal á heimsvísu að ræða. Sums staðar er rúmþyngdin meiri og annars staðar minni eins og sjá má á mynd 2.5.

2.3. Láréttar spennur

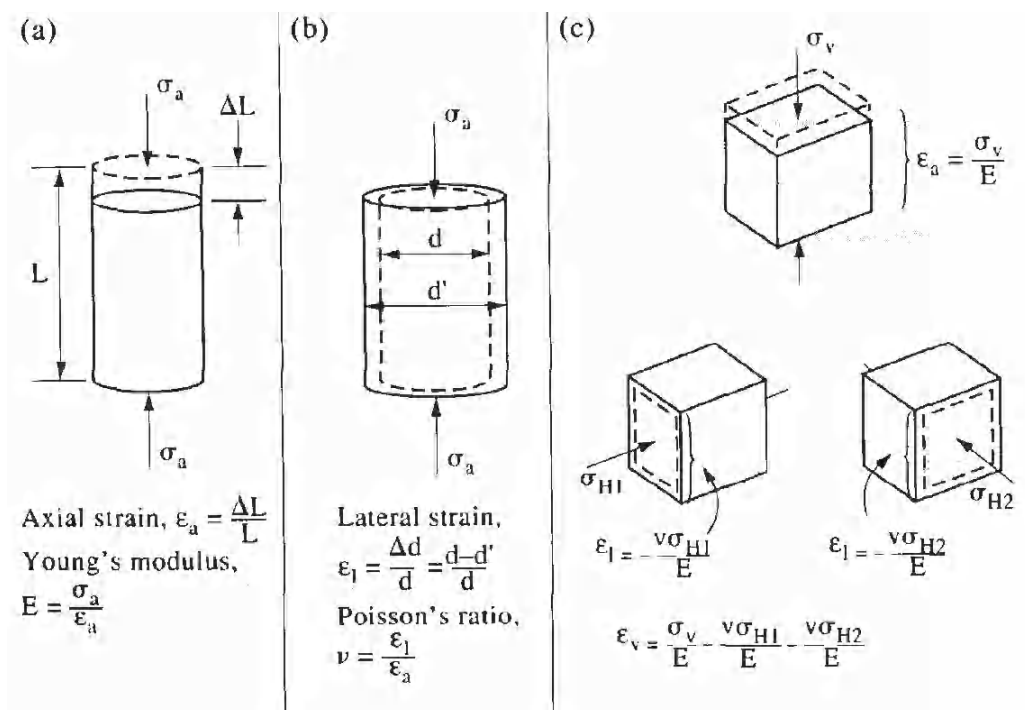
Út frá fjaðurfræði má skilgreina láréttar spennur sem hlutfall af lóðréttum spennum.

$$\sigma_{hor} = \frac{\nu}{1 - \nu} \cdot \sigma_v = k\sigma_v \quad (2.2)$$

Poisson's hlutfallið ν er skilgreint sem hlutfall á milli hliðarstreitu ε_{lat} og áslægrar streitu ε_{ax} .

$$\nu = \frac{\varepsilon_{lat}}{\varepsilon_{ax}} \quad (2.3)$$

Mynd 2.6 sýnir dæmi um streitur í bergsýni þar sem byggt er á fjaðurfræði.



Mynd 2.6: Streitur í bergsýni. a) Áslæg streita og fjaðurstuðull. b) Hliðarstreita og Poisson's hlutfall. c) Lóðréttar og láréttar streitur (Hudson & Harrison, 2002).

Þessi sambönd voru mikið notuð í bergtækni áður fyrr en hafa ekki reynst lýsa nægilega vel bergspennum í raunveruleikanum og hafa því ekki verið mikið notuð í seinni tíð. Poisson's hlutfallið ν getur ekki verið hærra en 0,5 og sé það sett inn í jöfnu 2.2 þá verða láréttar spennur aldrei hærri en þær lóðréttu ($\sigma_{hor} \leq \sigma_v$). Í raunveruleikanum er það hins vegar oftast tilfallið með berg, sérstaklega á litlu dýpi. Fjallað verður nánar um þetta í kafla 2.4.

Láréttar spennur orsakast aðallega af flekahreyfingum, landslagi, rofi, sprungum, misgengjum og göngum. Nánar er fjallað um áhrifaþætti á láréttar spennur í kafla 2.5.

2.4. k -stuðull

Í sinni einföldustu mynd lýsir k -stuðull hlutfallinu milli láréttra og lóðréttra spennu:

$$k = \frac{\sigma_{hor}}{\sigma_v} \quad (2.4)$$

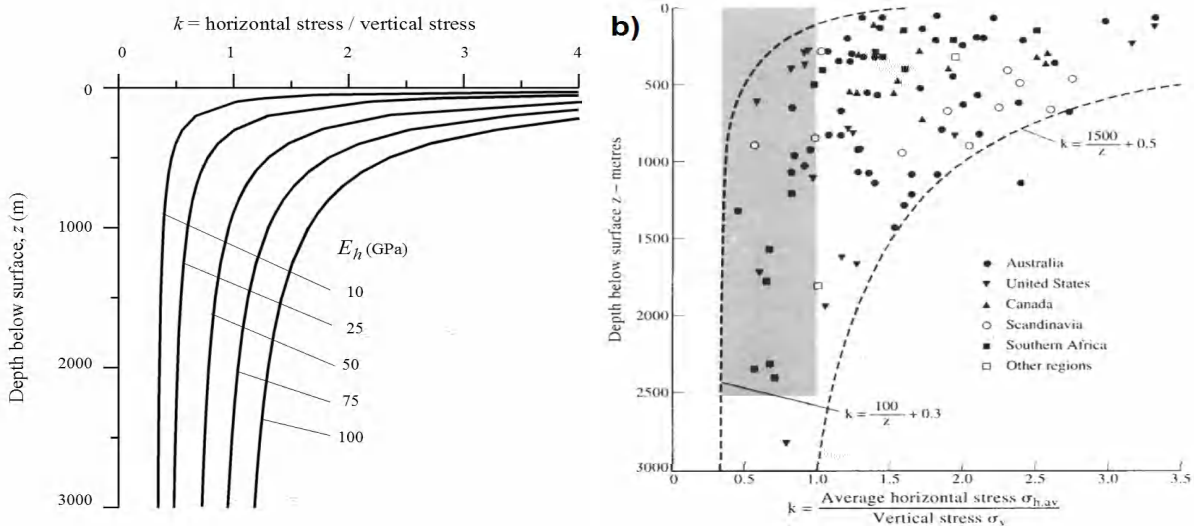
Þar sem láréttar spennur í bergi eru ekki þær sömu í allar áttir þá er k -stuðullinn gjarnan skilgreindur sem hlutfall meðaltals hæstu og lægstu lárétta spennu af lóðrétta spennu:

$$k = \frac{1/2(\sigma_H + \sigma_h)}{\sigma_v} \quad (2.5)$$

Þar sem σ_H er hæsta lárétta spenna, σ_h er lægsta lárétta spenna og σ_v er lóðrétta spenna. Á litlu dýpi getur k -stuðullinn verið mjög breytilegur og er venjulega hærri en 1 ($k > 1$), þ.e. láréttar spennur eru hærri en þær lóðrétta. Þegar komið er á meira dýpi breytist þetta og láréttar spennur verða almennt lægri en þær lóðrétta (Brady & Brown, 1985). Til að reikna k -stuðulinn skv. jöfnu 2.5 þá þarf σ_H og σ_h að vera þekkt og til þess þurfa bergspennumælingar að hafa farið fram á þeim stað sem verið er að skoða. Sheorey (1994) þróaði nálgunarjöfnu til að áætla k -stuðulinn án þess að gera bergspennumælingar en hún krefst þess að formbreytingarstuðull (*e. deformation modulus*) bergsins sé þekktur.

$$k = 0,25 + 7E_h \left[0,001 + \frac{1}{z} \right] \quad (2.6)$$

Þar sem E_h er formbreytingarstuðull í GPa mældur í lárétta stefnu og z er dýpi í m (Hoek, 2006). Mynd 2.7 sýnir k -stuðla reiknaða skv. líkingu Sheorey og einnig mældu stuðla á nokkrum stöðum í heiminum.



Mynd 2.7: T.v.: k -stuðull sem fall af dýpi reiknað skv. jöfnu (2.6) (Hoek, 2006).

T.h.: k -stuðlar á nokkrum stöðum í heiminum og ferlar sem marka efri og neðri mörk k -stuðlanna (Hudson & Harrison, 2002).

Mynd 2.7 sýnir að breytileiki á k -stuðlinum er mestur niður á 500-1000 m dýpi en eftir það fer breytileikinn minnkandi. Dýpstu jarðgöng á Íslandi eru Fáskrúðsfjarðargöng (*Matthías Loftsson, 2015. Munnleg heimild*) en þau eru á um 1000 metra dýpi þar sem þau eru dýpst (Dahle, 2005a). Af þessu mætti því ætla að láréttar spennur í íslenskum jarðgöngum væru einnig mjög breytilegar.

Af jöfnu (2.6) má ráða að tengsl séu á milli k -stuðuls og formbreytingarstuðuls bergmassans, E_h . Til eru nokkrar aðferðir til að áætla stærð E_h . Ef niðurstöður bergspennumælinga eru til þá má einangra hann beint úr jöfnu (2.6) en einnig má ákvarða hann út frá Q -gildi bergsins skv. skilgreiningu Barton o.fl. (1980, 1992)

$$E_h = 25 \log_{10} Q \quad (2.7)$$

og út frá E_i , D og GSI gildum bergs skv. líkingu Diederichs & Hoek (2005):

$$E_h = E_i \left[0,02 + \frac{1 - D/2}{1 + \exp\left(\frac{60+15D-GSI}{11}\right)} \right] \quad (2.8)$$

Q er gæðastuðull bergs m.t.t. jarðgangagerðar og er á lógaritmískum skala á bilinu 0,001–1000. Hann er skilgreindur sem:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (2.9)$$

þar sem

RQD	Lengdarhlutfall kjarnabrota $> 10cm$	J_a	Gerð og þykkt sprungufyllinga
J_n	Fjöldi sprungukerfa	J_w	Vatn í sprungum
J_r	Lögun og áferð sprunguflata	SRF	Lækkunarstuðull á spennuástand

GSI er stuðull sem ræðst af bergtegund og sprunguástandi. E_i er fjaðurstuðull einsleits og ósprungins bergsýnis og er skilgreindur sem:

$$E_i = MR \cdot \sigma_{ci} \quad (2.10)$$

þar sem MR er margföldunarstuðull fyrir bergtegundir (*e. modulus ratio*) og σ_{ci} er einása brotstyrkur einsleits bergsýnis.

D er skemmdarstuðull bergs við sprengingar og spennulosun en við vandaða sprengivinnu má áætla að hann sé u.þ.b. núll (Erlingsson, 2013a). Jöfnu (2.8) má því einfalda sem:

$$E_h = E_i \left[0,02 + \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{60-GSI}{11}\right)} \right] \quad (2.11)$$

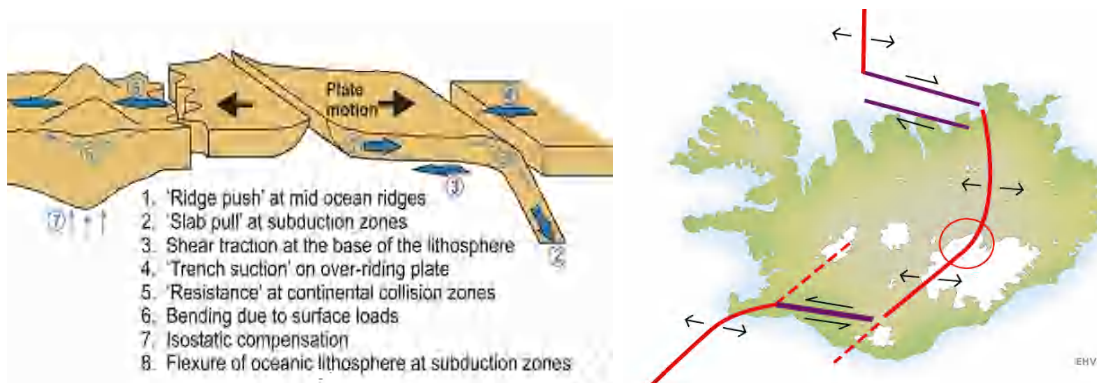
Tengsl k -stuðuls og formbreytingarstuðulsins E_h verða skoðuð nánar í kafla 6.3.

2.5. Áhrifaþættir á spennuástand í bergi

Spennur í bergi ákvarðast af þyngd bergsins en einnig hafa jarðfræðilegir eiginleikar þess mikið að segja. Spennuástand í bergi getur meðal annars ráðist af flekahreyfingum, landslagi, rofi, sprungum, misgengjum og göngum (lag- og berggöngum). Hér verður fjallað nánar um þessa þætti.

2.5.1. Flekahreyfingar

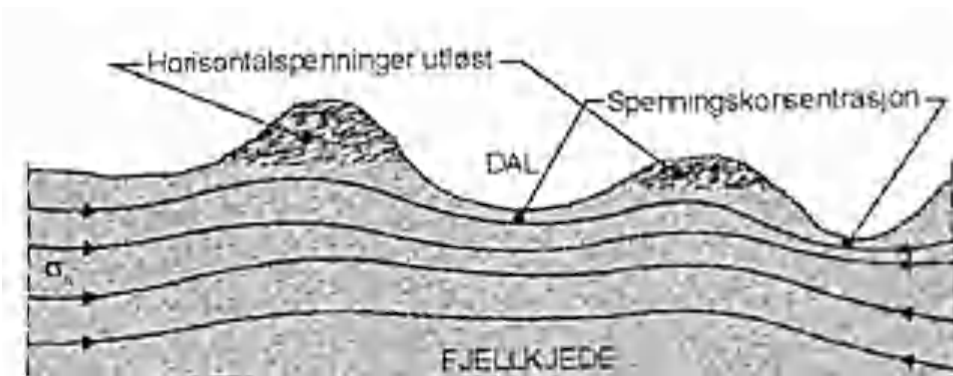
Spennuástand í bergi er að stórum hluta rakið til flekahreyfinga og er talið að þær stjórni láréttum spennum á stórum svæðum (Hudson & Harrison, 2002) og þá sérstaklega þegar komið er á mikið dýpi. Flestir jarðskjálftar verða á 2-15 km dýpi og má því ætla að á því dýpi hafi flekahreyfingar mikil áhrif á spennuástandið. Á minna dýpi hafa aðrir þættir meiri áhrif á spennuástandið (Matthías Loftsson, 2016. Munnleg heimild). Virkar flekahreyfingar á ákveðnu svæði þurfa ekki að gefa til kynna að skjálftavirkni sé á svæðinu því bergmassi hegðar sér á plastískan hátt sé litið á hann yfir stórt landsvæði (Brady & Brown, 1985). Ísland er á tveimur flekum, Evrasíu og Norður-Ameríkuflekanum, og ná mörk þeirra skáhallt yfir landið í SV-NA átt. Flekamörk eru ýmist kölluð flekamót eða flekaskil. Flekamót er það kallað þegar flekarnir þrýstast hvor að öðrum. Á Íslandi á sér stað gliðnun, sem þýðir að flekarnir færast frá hvor öðrum og er það því kallað flekaskil. Af þeim sökum eru láréttar bergspennur á Íslandi því almennt lægri en annars staðar í heiminum séu þær miðaðar við lóðréttar spennur á sama dýpi, þ.e. *k*-stuðullinn verður lægri. Mynd 2.8 sýnir ýmsar tegundir flekahreyfinga og legu flekaskilanna í gegnum Ísland.



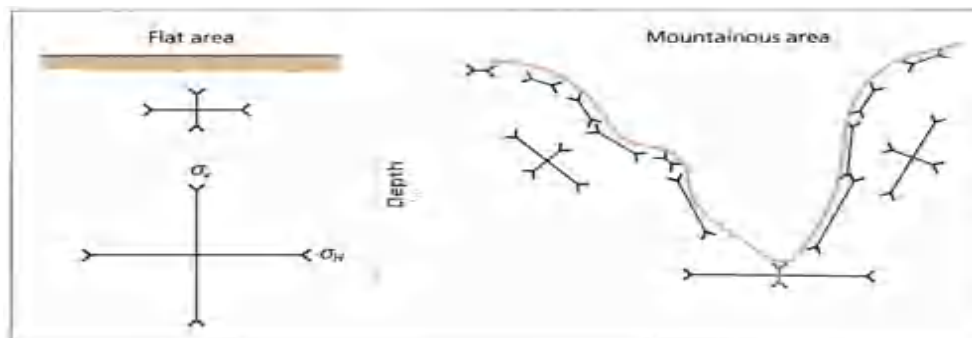
Mynd 2.8: T.v.: Algengustu tegundir flekahreyfinga í heiminum (Tingay o.fl., 2005).
T.h.: Lega flekaskila í gegnum Ísland (Emil H. Valgeirsson, 2010).

2.5.2. Landslag

Á flatlendi má nálga lóðréttar meðalspennur sem fall af dýpi ($\sigma_v = \gamma z$). Í óreglulegu landslagi eins og sýnt er á mynd 2.9 má skilgreina lóðréttar spennur sem fall af dýpi undir þeim punkti sem verið er að skoða. Eftir því sem dýpið frá yfirborði eykst því minni áhrif hefur landslag á láréttar spennur (Brady & Brown, 1985). Í dölum og fjörðum, sem hafa hliðarhalla yfir 25° og dýpi meira en 500 m, má búast við hlutfallslega háum láréttum spennum samanborið við þær lóðréttu, þ.e. hár k -stuðull (Birgir Jónsson, 1984). Á fjallstoppum eru láréttar spennur að sama skapi hlutfallslega lágar samanborið við þær lóðréttu. Myndir 2.9 og 2.10 sýna mismunandi yfirborð og áhrif þess á spennudreifingu.



Mynd 2.9: Í dölum eru láréttar spennur háar á litlu dýpi. Að sama skapi eru láréttar spennur lægri á hæðum og fjallstoppum. Eftir því sem dýpra er komið þá minnka áhrif landslags á spennuástand bergsins (Hagen, 2015).



Mynd 2.10: Áhrif mismunandi yfirborðs á spennudreifingu. Lengd striks gefur til kynna stærð spennuþáttar (de Vallejo & Ferrer, 2011).

2.5.3. Rof / Eyðing

Rof (*e. erosion*) á yfirborði, t.d. vatns-, jökul- og sjávarrof, minnkar dýptina á þeim stað í berginu sem verið er að skoða. Gera má ráð fyrir að bergmassinn sé í stöðugu ástandi áður en rof (eyðing) á sér stað. Fræðilega mun rof leiða til lægri lóðréttra og láréttra spenna, sbr. jöfnur (2.1) og (2.2). Þrátt fyrir það þá hefur spennuástand það sem myndast í bergmassa oft þá tilhneigingu til að haldast óbreytt þrátt fyrir að mikill þungi hafi horfið vegna rofs. Þetta getur leitt til spennuástands þar sem k -hlutfallið verður hátt, sérstaklega á litlu dýpi (Brady & Brown, 1985). Á Íslandi hafa jöklar átt stóran þátt í rofi/eyðingu landsins. Skýrustu dæmin um jökulrof á Íslandi má sjá á Vestfjörðum, Tröllaskaga og Austfjörðum (Sigurður Steinþórsson, 2012). Mynd 2.11 sýnir hvernig jöklar hafa mótað landslagið á Tröllaskaga.

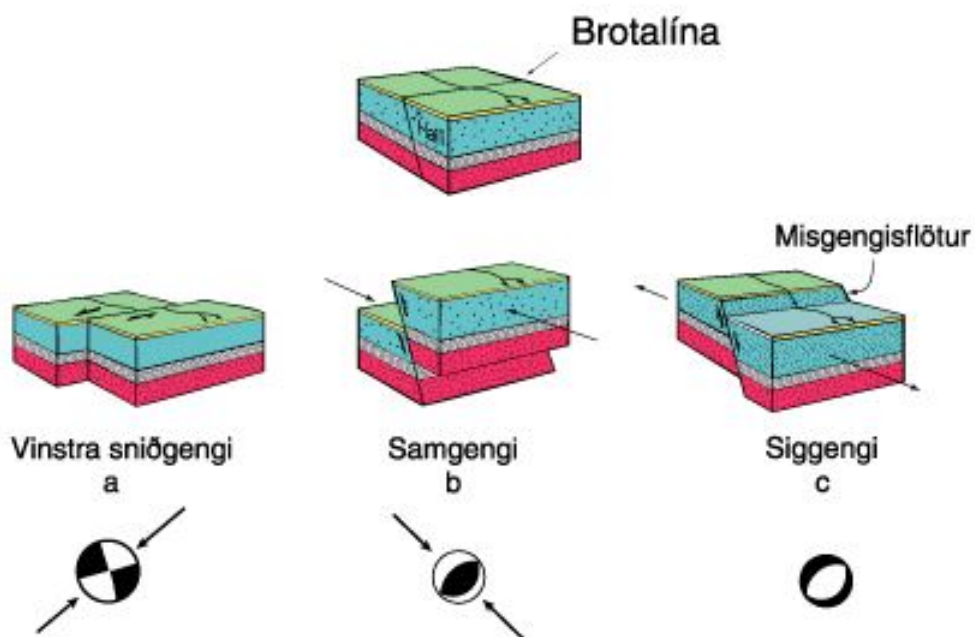


Mynd 2.11: Tröllaskagi á Norðurlandi. Jökulrof á þar stóran þátt í mótn landslagsins (Ljósmynd © Mats Wibe Lund, www.mats.is).

2.5.4. Sprungur og misgengi

Sprungur og misgengi í bergi, annað hvort staðbundið eða það sem nær yfir stærra svæði, hafa áhrif á jafnvægisástandið í berginu. Lóðréttar sprungur, eða samgengi (sjá mynd 2.12), í upplyftu bergi eins og hryggjum (*e. ridge*) myndast gjarnan vegna lágra láréttra spenna. Stefna sprungna, lögun og yfirborðseiginleikar sem verða vegna þrýstibrots, getur gefið vísbendingar um spennuástand bergsins og þá hvernig sprungumyndun er líkleg til að verða. Sérstaklega gefur sprungukerfi til kynna hvernig stefna stærstu höfuðspennu var áður en sprungurnar mynduðust. Þessi fullyrðing er byggð á sama grunni og hegðun bergsýnis í þríasaprófi. Sprungumyndun í bergi er í raun atburður þar sem orkulosun á sér stað og spennur dreifast upp á nýtt.

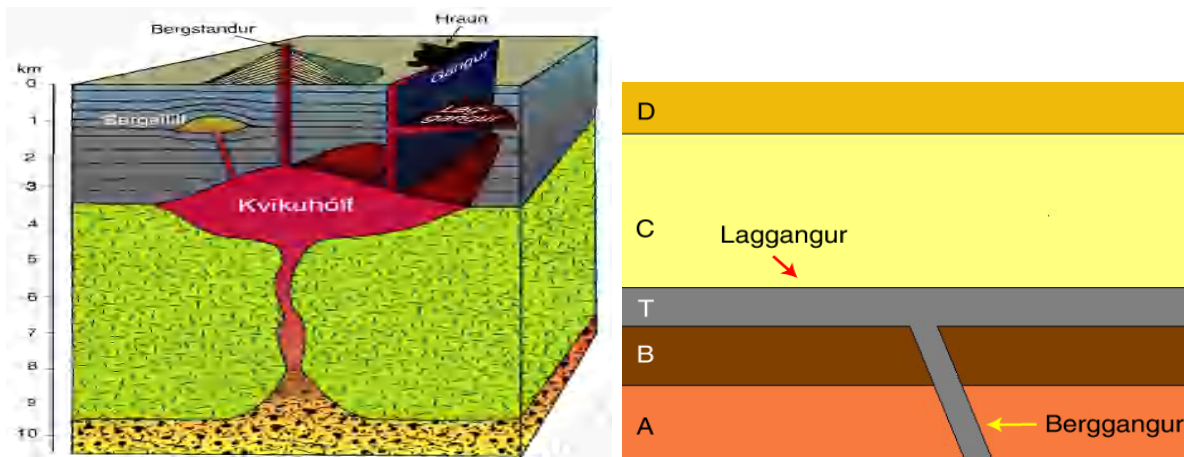
Spennuástand í bergi, áður en sprungur myndast í því, er talsvert ólíkt því spennuástandi sem verður eftir myndun sprunganna. Sprungur og misgengi í bergi hafa venjulega mismunandi stefnu. Sundurleitt spennusvið er þess vegna eðlileg afleiðing af sprungumyndun (Brady & Brown, 1985).



Mynd 2.12: Þrjár helstu gerðir misgengja í bergi (Guðbjartur Kristófersson, 2013).

2.5.5. Gangar

Ganga má skilgreina sem berg sem hefur fyllt upp í sprungu eða kviku sem storknað hefur í aðfærsluæð eldstöðvar. Einnig geta gangar myndast þegar sandur fellur í sprungu og harðnar meira en bergið í kring. Göngum er gjarnan skipt í bergganga og lagganga. Bergganga er berglag sem liggur þvert á eldri berglög en lagganga er berglag sem liggur samsíða öðrum berglögum (Guðbjartur Kristófersson, 2013), sjá mynd 2.13. Eldvirkni á Íslandi er mikil og mikið er um sprungur og misgengi m.a. vegna gliðnunar flekanna. Einnig er íslenskt berg mjög ungt og styrkur þess almennt ekki mikill. Þetta eru kjör- aðstæður fyrir myndun ganga og eru þeir þess vegna nokkuð algengir í íslenskum berglaga- stafla. Vegna þess þrýstings sem myndast þegar kvika og berg fyllir í sprungur þá getur spennuástand næst fylltu sprungunum verið annað en þegar horfið er aðeins lengra frá þeim.



Mynd 2.13: T.v.: Sýnir hvernig gangar myndast vegna eldvirkni.

T.h.: Einföld skýringarmynd á lag- og berggöngum (Guðbjartur Kristófersson, 2013).



Mynd 2.14: Bergganga við Reykjanestá (Guðmundur Ómar Friðleifsson, e.d.).

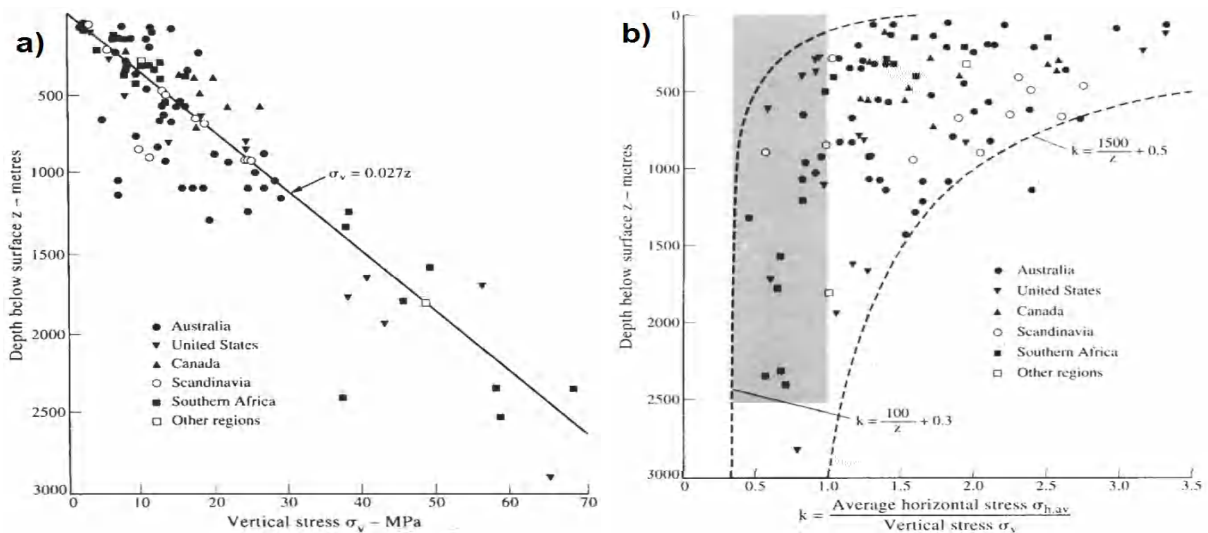
2.6. Yfirlit yfir bergspennur í heiminum

Við mat á lóðréttum spennum er iðulega gert ráð fyrir að þær vaxi línulega með dýpi, $\sigma_v = \gamma z$, þar sem γ er rúmpýngd bergsins ($\approx 0,027 \text{ MN/m}^3$). Þessi nálgun er notuð á Íslandi jafnt sem annars staðar í heiminum. Ekki er jafn auðvelt að áætla láréttar spennur. Mynd 2.15a sýnir samantekt Hoek og Brown (1980) á bergspennumælingum á nokkrum svæðum í heiminum. Samkvæmt samantekt þeirra þá eru k -hlutföll á heimsvísu á bilinu (Hudson & Harrison, 2002):

$$\left(\frac{100}{z} + 0,3\right) < k < \left(\frac{1500}{z} + 0,5\right)$$

Þessi mörk eru sýnd á mynd 2.15b. Formbreytingarstuðullinn E_h í jöfnu (2.6) á bls. 8 væri þá á bilinu:

$$14 \text{ GPa} < E_h < 170 \text{ GPa}$$



Mynd 2.15: T.v.: Lóðréttar bergspennumælingar á nokkrum svæðum í heiminum.

T.h.: k -stuðlar á sömu svæðum (Hudson & Harrison, 2002).

Árið 1986 var sett af stað „World Stress Map” verkefnið (WSM). Var það samvinnu-verkefni vísindamanna, atvinnulífs og stjórnvalda nokkurra ríkja sem gekk út á að safna saman gögnum um bergspennur á heimsvísu, þar með talið á Íslandi. Árið 2005 innihélt gagnabankinn yfir 14.000 gagnapunkta um stefnur hæstu láréttu spennu. Stærstur hluti upplýsinganna í WSM er fenginn úr jarðskjálftagögnum en einnig úr bergspennumælingum eins og þeim sem lýst er í kafla 4 (Tingay o.fl., 2005). Gögn úr WSM eru flokkuð eftir gæðum og sýnd með stikum á korti og tákna lengd þeirra hversu góð gæðin eru (Hoek, 2006). Skilgreining á flokkun gæðanna er sýnd í töflu 2.1.

2. Bergspennur

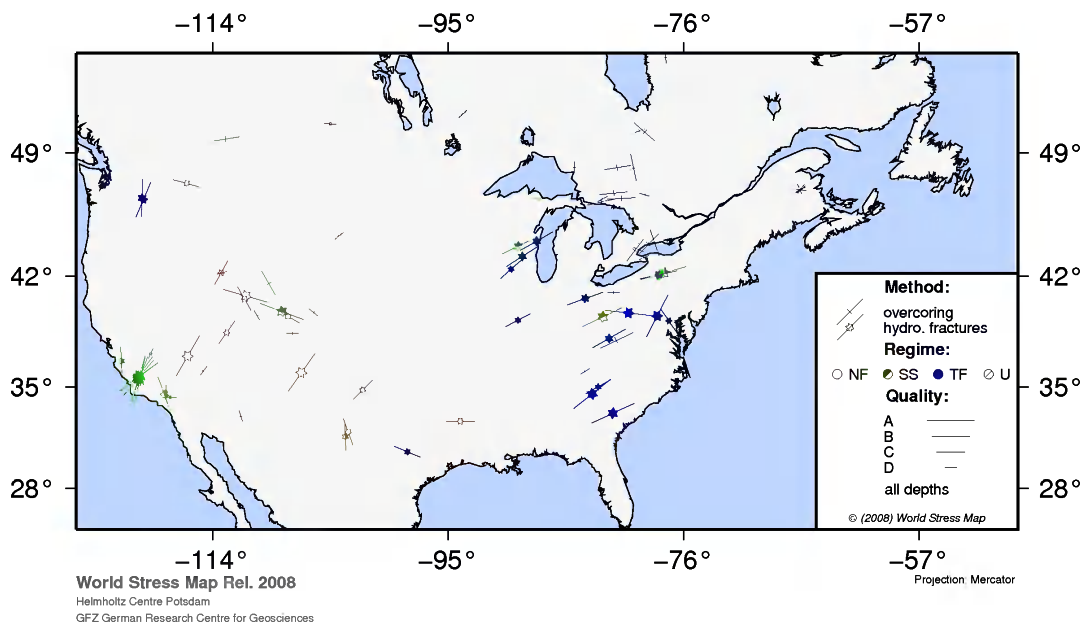
Tafla 2.1: Skilgreining WSM á gæðum gagna um stefnu σ_H (Reinecker o.fl., 2008).

Gæði	Fj. mælinga	Dýpi [m]	SF*
A	≥ 11	≥ 300	$\leq 12^\circ$
B	≥ 8	≥ 100	$\leq 20^\circ$
C	≥ 5	≥ 30	$\leq 25^\circ$
D	≥ 2	≥ 10	$\leq 40^\circ$
E**	< 2	< 10	$> 40^\circ$

*SF = Staðalfrávik

**Nóg að uppfylla aðeins eitt skilyrðið.

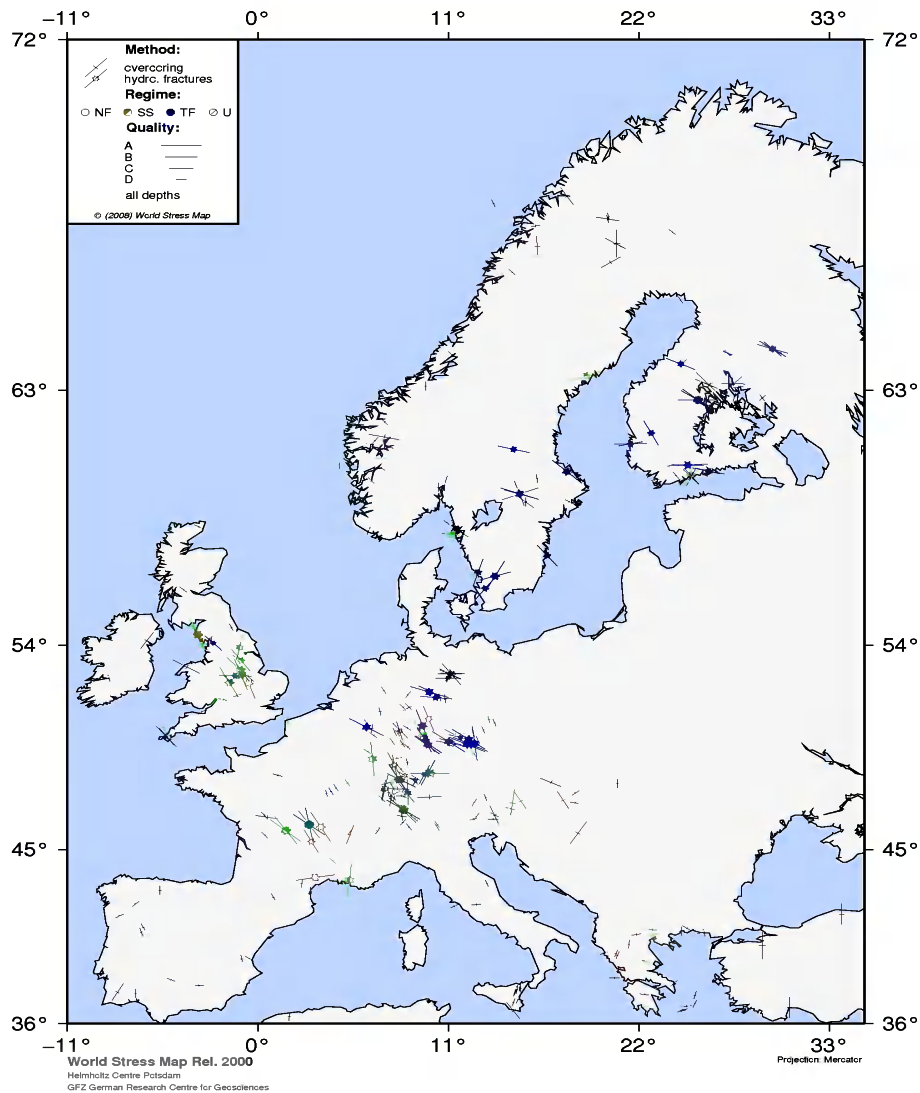
Heimasíða WSM býður upp á þann möguleika að notandi geti búið til spennukort eftir eigin höfði byggt á gagnagrunni WSM. Hér verða skoðuð spennukort af Norður-Ameríku og Evrópu sem byggjast eingöngu á staðbundnum (*e. in situ*) bergspennumælingum, þ.e. yfirborun og vökvaprýstiprófi. Gagnagrunnur WSM inniheldur engin gögn um bergspennumælingar með plötutjökkun.



Mynd 2.16: Stefnur σ_H í N-Ameríku byggt á staðbundnum (*e. in situ*) spennumælingum (Heidbach o.fl., 2008).

Mynd 2.16 sýnir hluta af Norður-Ameríku en engar bergspennumælingar höfðu farið fram á svæðum utan kortsins. Myndin sýnir að meginstefna σ_H er í N-S / NA-SV átt með nokkrum undantekningum. Sjá má á mynd 2.17 að stefna σ_H í Evrópu er ekki jafn afdráttarlaus og í Norður-Ameríku. Tafla 2.2 sýnir samanburð á gæðum gagnanna frá Norður-Ameríku

og Evrópu. Sjá má að mælingarnar í Norður-Ameríku eru talsvert áreiðanlegri þar sem mun herra hlutfall gagnanna eru af gæðum A og B heldur en í Evrópu.



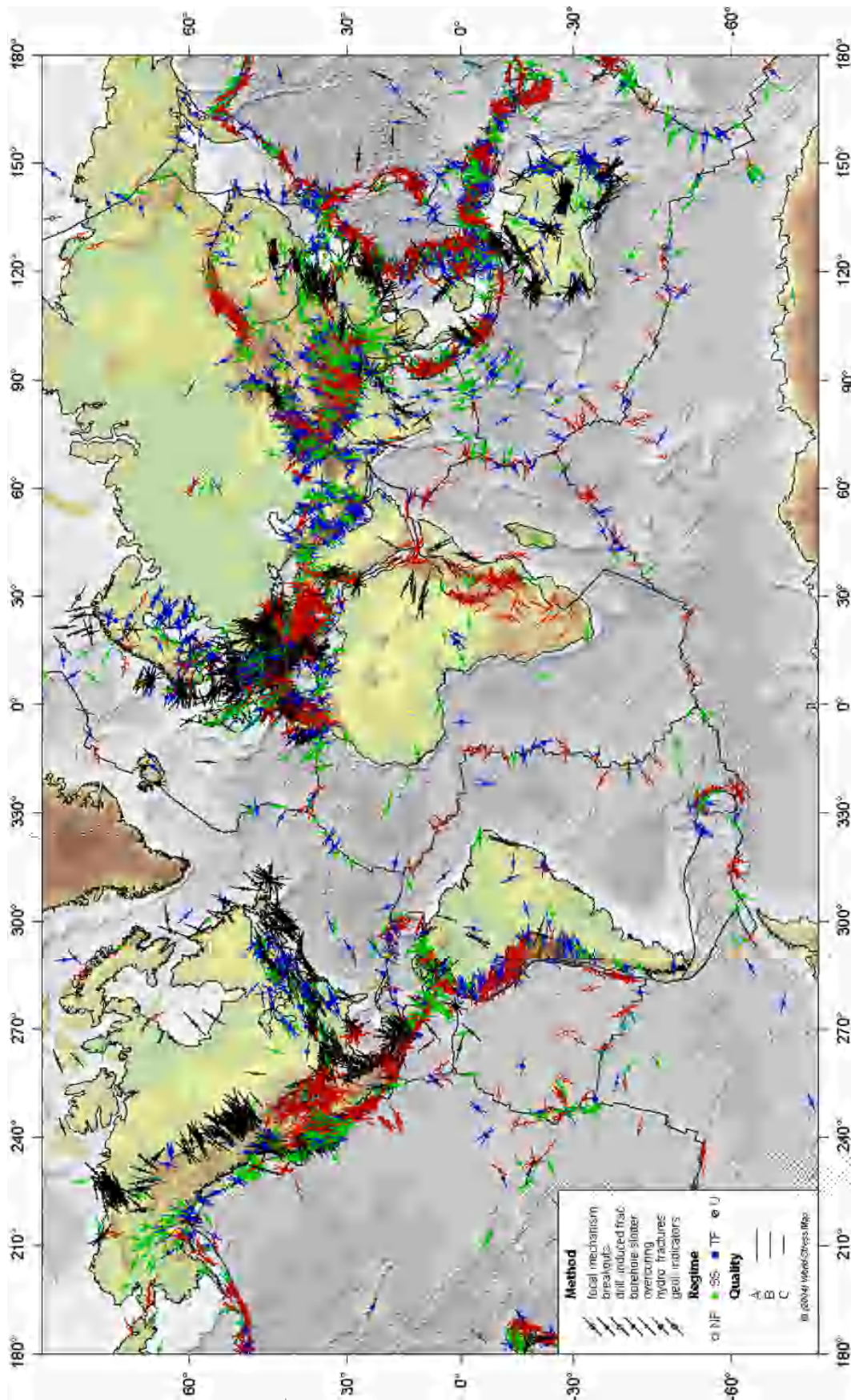
Mynd 2.17: Stefnur σ_H í Evrópu byggt á staðbundnum (e. in situ) spennumælingum (Heidbach o.fl., 2008).

Tafla 2.2: Gæði bergspennumælinga í N-Ameríku og Evrópu (Heidbach o.fl., 2008).

	A	B	C	D	E
N-Ameríka	23%	11%	28%	28%	9%
Evrópa	3%	7%	46%	31%	13%

Mynd 2.18 sýnir hvernig stefnur hæstu láréttu spenna í heiminum liggja, byggt á gögnum úr WSM.

2. Bergspennur



Mynd 2.18: Kort sem sýnir stefnur hæstu lárétu spenna víða um heim (Heidbach o.fl., 2008).

3. Jarðfræði Íslands

3.1. Myndun og mótun íslensks bergs

Ísland er eyja á mið Atlantshafshryggnum þar sem Evrasíu- og Norður-Ameríku flekinn mætast. Vestari hluti landsins er á Norður-Ameríkuflekanum og sá eystri á Evrasíuflekanum. Ísland er einn af fáum stöðum á jörðinni þar sem hryggur eins og mið Atlantshafshryggurinn er sýnilegur yfir sjávarmáli, en einungis um 1% alls úthryggjakerfisins er ofan-sjávar (Kristján Sæmundsson & Einar Gunnlaugsson, 1999). Ísland liggur ofan á heitum reit og hefur að stórum hluta myndast af gosefnum frá möttulstróknum sem kemur uppá yfirborðið í gegnum flekaskilin. Flekahreyfingar eru taldar mega rekja til hægra hreyfinga á heitum straumum í möttli jarðar og togkröftum sem myndast þegar flekarnir síga niður í möttulinn. Hafsbotnsbreiðan (*e. ocean floor spreading*) á því stóran þátt í mótun og tilvist Íslands, þar sem stærstur hluti jarðskorpunnar kemur úr gosmyndunum. Þegar ný jarðskorpa myndast við sprungusvæði grefst eldri berggrunnur undir kvikuflæði sem færast lengra frá flekajöðrunum. Gliðnun flekana á Íslandi er um 20 mm á ári (Loftsson o.fl., 2006). Berglagastaffli Íslands hefur orðið til í gliðnunarbeltunum þar sem hvert berglagið hefur hlaðist ofan á annað og fergt og sveigt undirlagið niður. Þegar upphleðslan hætti tóku roföflin við. Jöklar fóru að myndast seint á tertíer og ísöld og fóru þá dalir að dýpka og lengjast, en samhliða því léttist landið og fór að rísa til mótvægis við rofið (Kristján Sæmundsson & Einar Gunnlaugsson, 1999).

Elsta bergið á Íslandi er basaltslétta sem talin er vera um 20-25 milljón ára gömul. Það er þó hvergi sjáanlegt á yfirborðinu. Elsta bergið sem sjáanlegt er á yfirborðinu er talið hafa myndast fyrir um 16 milljónum ára. Það er að finna á austur- og norðvesturlandi. Nokkrar eldstöðvar eru að finna á flekaskilunum með tektónískum sprungum og misgengjum. Þessar sprungur og misgengi ásamt jarðskjálftavirkni valda því að gliðnun á sér stað á mið Atlantshafshryggnum sem liggur í gegnum Ísland. Stefna misgengjanna er almennt samsíða eða næstum samsíða stefnu flekaskilanna (Loftsson o.fl., 2006).

Íslensku bergi er almennt skipt í eftirfarandi hluta (Loftsson o.fl., 2006):

Tertíer sléttu basalt myndun (*e. Tertiary plateau basalt formation*)

Bergið er byggt upp af láréttum jarðlögum með staðbundnum basalt lögum, oftast með gjall yfirborði, milli aðliggjandi basalt- og setlaga. Eiginleikar þessara laga eru mjög ólíkir. Basaltið er hart, með háan styrk og fjadurstuðul, á meðan gjallið og setlögin eru veikari og mýkri.

3. Jarðfræði Íslands

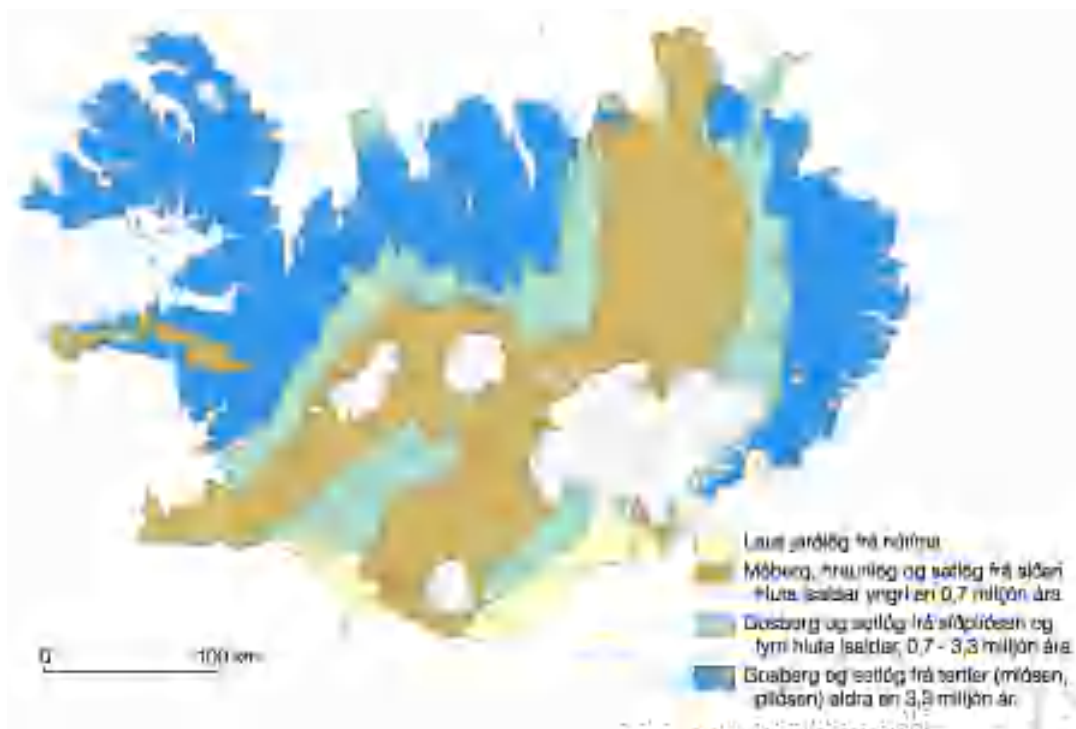
Basalt og móberg myndað á ísöld (e. *Pleistocene basalt and hyeloclastic formation*)

Basaltið myndaðist á hlýskeiðum ísaldarinnar en þá var öll eldvirkni undir þykkri jökulbreiðu. Eldsumbrot hafa brætt holur á ísinn og þar af leiðandi áttu þau sér flest stað undir bráðnuðu vatni. Aðal bergið sem myndaðist á ísöld var móberg.

Nútíma berg (e. *Holocene formation*)

Hraun og setlög sem myndaðist eftir ísöld.

Mynd 3.1 sýnir jarðfræðikort af Íslandi.



Mynd 3.1: Jarðfræðikort af Íslandi (Guðbjartur Kristófersson, 2013).

Flotjafnvægi (e. *isostasy*) átti stóran þátt í mótun Íslands. Á ísöld var það þungi frá nýmynduðu gosbergi og jökulbreiðunni sem þrýsti landinu niður, en á hlýrri skeiðum lyftist landið upp til að viðhalda jafnvægi milli þungans frá jarðskorpunni og upplýftikraftinum frá möttulstrókinum að neðan. Jökulbreiðan sem þakti Ísland á ísöld var nokkur hundruð metra þykk og þunginn frá ísnum þrýsti jarðskorpunni niður á við á sama tíma og jöklar í dölum mótuðu yfirborðið þar. Hægt er að áætla á hvaða dýpi berg í dölum var, með því að rannsaka ummyndunarsteindir og útfellingar sem finnast í holum og sprungum. Á norður- og austurlandi er áætlað að allt að 1500 m af bergi hafi eyðst af hinu upprunalega tertíer basalti. Á suðausturlandi er eyðingin talin hafa verið um 2000 m og 1000 m á norðvesturlandi. Annars staðar á landinu var eyðingin minni (Loftsson o.fl., 2006).

3.2. Áhrif bergspenna á jarðgangapversnið í íslensku bergi

Misjafnt er eftir berggæðum hversu mikil áhrif staðbundnar spennur hafa á bergið. Einnig skiptir máli í hvaða átt höfuðspennurnar snúa, þ.e. stærð k -stuðulsins. Hér verður sett upp tvívítt líkan af algengu veggangapversniði í íslenskum bergaðstæðum og áhrif af spennuástandinu skoðað. Til þess er notað forritið RS^2 sem notar einingaraðferðina (*e. Finite Element Method*) og tölulega greiningu til útreikninga á spennum, færslum og stærð brotsvæða umhverfis gangapversnið (RocScience, 2015). Forritið deilir berginu niður í margar stakar einingar sem tengjast með hnútpunktum og reiknar svo spennur, færslur o.fl. í hverri einingu miðað við álagið frá einingunum í kring. Þannig má svo sjá heildar spennuástandið í berginu. Við útreikninga RS^2 verður notast við brotlíkingu Hoek-Brown (Hoek o.fl., 2002):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left[m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right]^a \quad (3.1)$$

þar sem σ_1 og σ_3 eru stærstu og minnstu höfuðspennur. σ_{ci} er einása brotstyrkur einsleits og ósprungins bergsýnis, m_b , s og a eru efnisstuðlar sem ráðast af bergtegund og heilleika bergsins:

$$m_b = m_i \cdot \exp \left[\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right] \quad (3.2)$$

$$s = \exp \left[\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right] \quad (3.3)$$

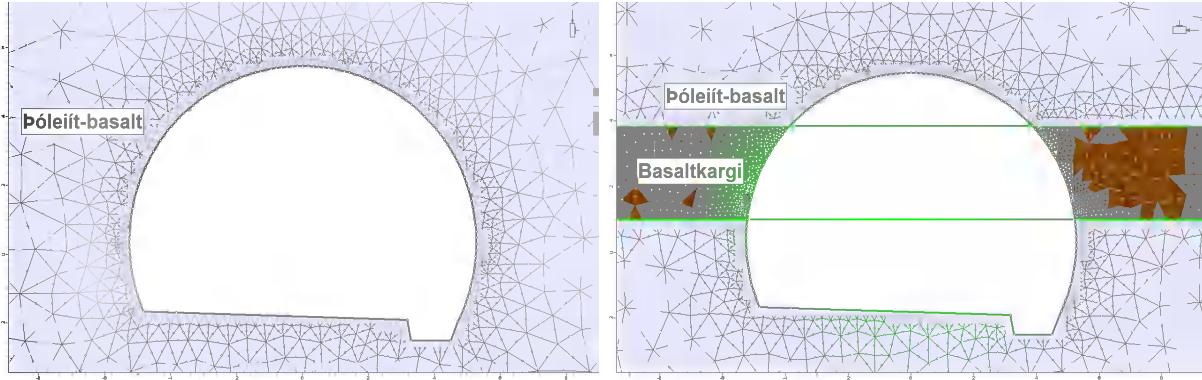
$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right] \quad (3.4)$$

m_i er efnisstuðull sem ræðst af eiginleikum ósprungins bergs. GSI stendur fyrir „*Geological Strength Index*” og er stuðull sem ræðst af sprunguástandi og bergtegund. D stendur fyrir „*Disturbance Factor*” og ræðst af því hversu skemmt bergið verður við sprengingar og spennulosun.

Notast verður við þversnið T9,5 líkt og í Vaðlaheiðargöngum en með því er átt við að götubreidd ganganna er 9,5 m. Skoðuð verða tilfelli fyrir þrjá k -stuðla í tveimur mismunandi bergaðstæðum á 500 m dýpi. Annars vegar í þóleiít-basalti eingöngu og hins vegar í þóleiít-basalti og basaltkarga, sjá mynd 3.2. Notaðir verða efnisstuðlar fyrir þessar bergtegundir eins og þeir voru í salva F377 í Norðfjarðargöngum. Upplýsingar um efnisstuðlana eru fengnar úr meistaraprófsritgerð Helgu Jónu Jónasdóttur sem fjallaði

3. Jarðfræði Íslands

um bergstyrkingar og líkanagerð af Norðfjarðargöngum (Helga Jóna Jónasdóttir, 2015). Við líkanagerðina og útreikninga í RS^2 er stærð rammans utan um gangaþversniðið höfð fimmfalt meiri en sjálft þversniðið. Fyrir líkanið sem er í þóleiit-basalti eingöngu var berginu umhverfis þversniðið skipt í 3002 einingar og í líkaninu með bæði þóleiit-basalt og basaltkarga skiptist það í 3735 einingar, en þetta voru sjálfvaldar stillingar forritsins. Með auknum fjölda eininga mætti svo fá enn nákvæmari greiningu.



Mynd 3.2: Jarðlagaskipan af líkönunum tveimur. Götubreidd ganganna er 9,5 m. Þysjald er inn í líkanið þannig að gangaþversniðin sjáist sem best.

Tafla 3.1: Inntaksstærðir bergtegundanna.

	Þóleiit-basalt	Basaltkargi
σ_{ci}	225 MPa	25 MPa
GSI	65	55
m_i	25	13
D	0	0

Tafla 3.2: Hoek-Brown stuðlar bergtegundanna skv. jöfnum (3.2) - (3.4).

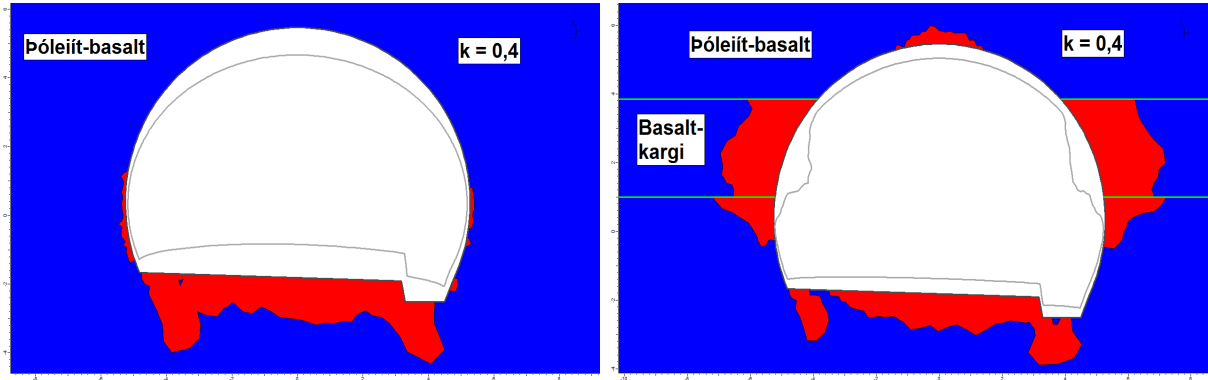
	Þóleiit-basalt	Basaltkargi
m_b	7,163	2,606
s	0,0205	0,0067
a	0,502	0,504

Tafla 3.3: Staðbundnar spennur á 500 m dýpi fyrir útgröft skv. jöfnum (2.1) og (2.2).

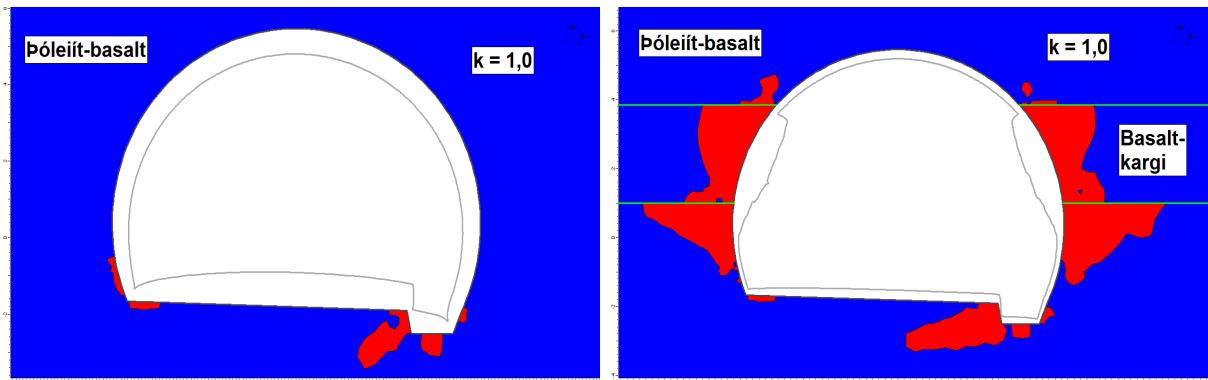
	$k = 0,4$	$k = 1,0$	$k = 2,0$
σ_v [MPa]	13,5	13,5	13,5
σ_{hor} [MPa]	5,4	13,5	27,0

Myndir 3.3 - 3.5 sýna áhrif mismunandi spennuástands á bergtegundir umhverfis T9,5 veggangaþversnið, skv. tvívíðri greiningu í forritinu RS^2 . Ákveðið var að hafa myndirnar sem einfaldastar, þ.e. láta þær einungis sýna stærð plastískra svæða (brotsvæða) sem er afleiðing af spennudreifingunni, en ekki spennudreifinguna sjálfa. Einnig sýna myndirnar hlutfallslegar bergfærslur.

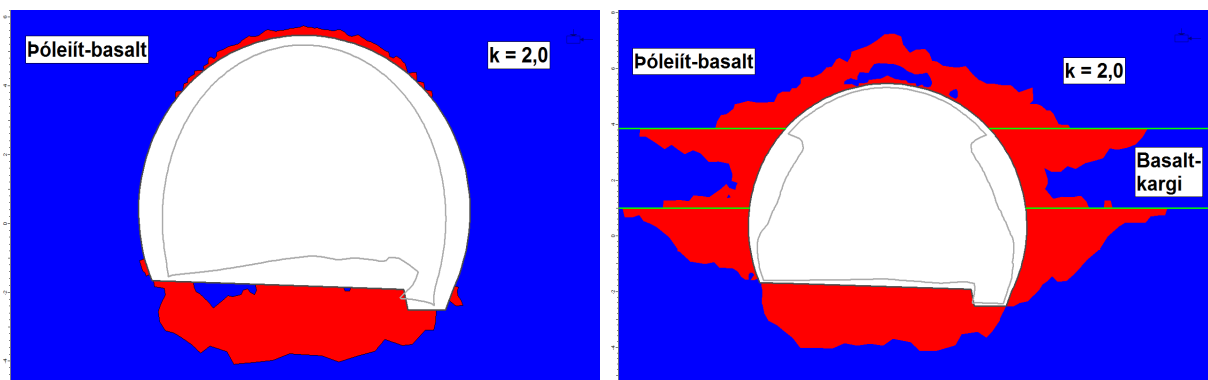
3.2. Áhrif bergspenna á jarðgangabversnið í íslensku bergi



Mynd 3.3: Rauði liturinn sýnir stærð brotsvæða umhverfis gangabversniðið þegar lóðréttar spennur eru hæstar, þ.e. $k=0,4$. Grái ferillinn táknar hlutfallslegar bergfærslur.



Mynd 3.4: Rauði liturinn sýnir stærð brotsvæða umhverfis gangabversniðið þegar lóðréttar og láréttar spennur eru jafnháar, þ.e. $k=1,0$. Grái ferillinn táknar hlutfallslegar bergfærslur.

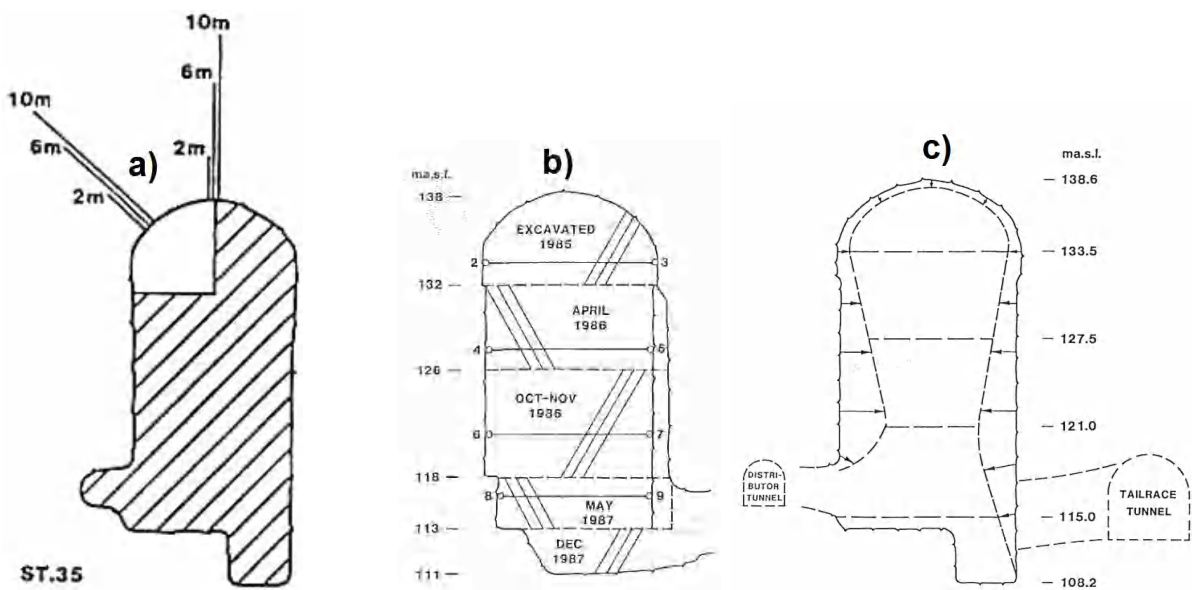


Mynd 3.5: Rauði liturinn sýnir stærð brotsvæða umhverfis gangabversniðið þegar láréttar spennur eru hæstar, þ.e. $k=2,0$. Grái ferillinn táknar hlutfallslegar bergfærslur.

3. Jarðfræði Íslands

Þegar myndir 3.3 - 3.5 eru skoðaðar má sjá að minnstar skemmdir verða á berginu umhverfis þversniðið þegar spennurnar eru jafnmiklar úr öllum áttum, þ.e. $k = 1,0$ en mestar þegar láréttar spennur eru hæstar, þ.e. $k = 2,0$. Þegar láréttar spennur eru ráðandi eru brotsvæðin fyrst og fremst í þaki og gólfi ganganna en það skapar mun meiri hættu fyrir starfsfólk og notendur ganganna ef grjóthrun verður úr þaki frekar en veggjum. Einnig er greinilegt að bergið er mun viðkvæmara þegar lag af basaltkarga liggur í gegnum þversniðið.

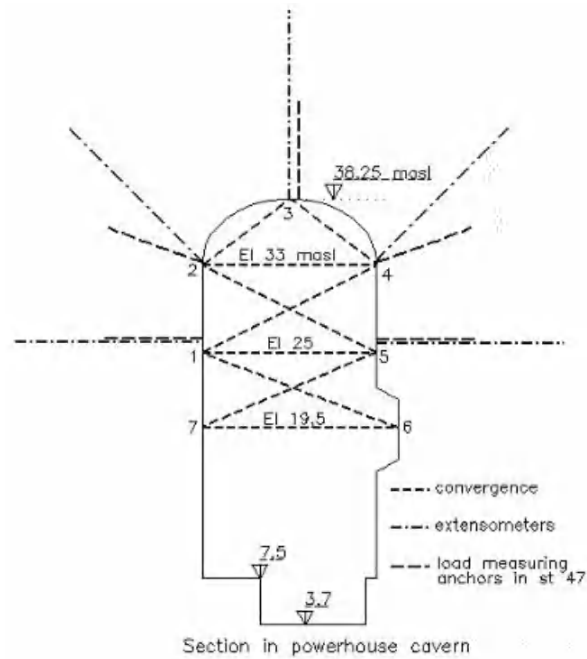
Á Íslandi voru gerðar mælingar á bergfærslum í stöðvarhúshellum Blöndu- og Kárahnjúkavirkjana (Fljótsdalsstöð), sem fall af tíma frá útgreftri. Í Blönduvirkjun voru bergfærslur mældar með stangarfærslumæli (e. *rod extensometer*) og nákvæmnismálbandi (e. *tape extensometer*), sjá myndir 3.6a og 3.6b. Mestu færslurnar mældust 90 mm vegg í vegg, þ.e. veggirnir færðust nær hvor öðrum um 90 mm, og er það sýnt á mynd 3.6c. Mældar færslur reyndust vera örlítið meiri heldur en spáð hafði verið í líkani gerðu með einingaraðferðinni en það er rakið til þeirra takmarkana sem líkön sem þessi hafa til að herma nákvæmlega eftir raunverulegum aðstæðum. Líkanið þótti engu að síður gefa góða nálgun á hegðun bergsins (Þorgrímsson o.fl., 1991).



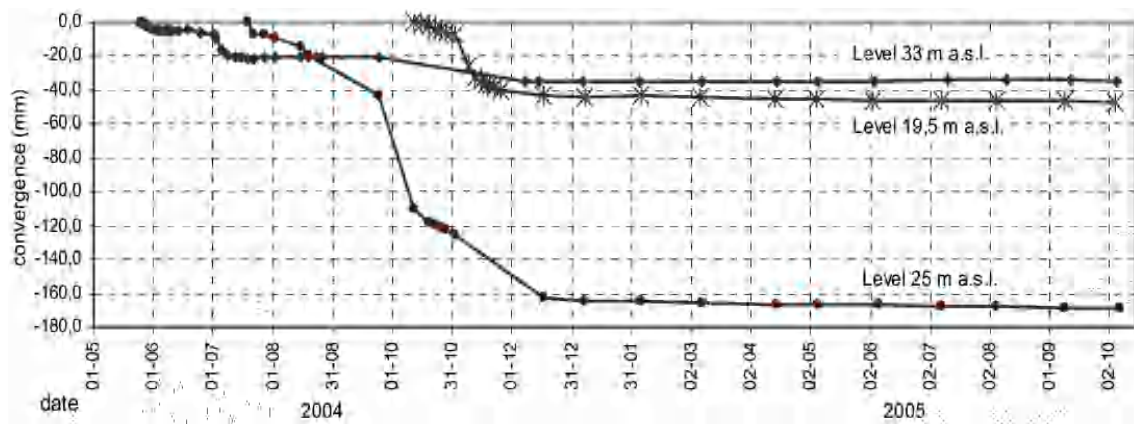
Mynd 3.6: Þversnið af stöðvarhúshelli Blönduvirkjunar. a) Stangarfærslumælar í lofti hellisins. b) Nákvæmnismálbönd strengd yfir hellinn. Sýnir einnig hvenær hvaða hluti hellisins var grafinn. c) Hlutfallslegar bergfærslur í veggjum og þaki hellisins (Þorgrímsson o.fl., 1991).

Í stöðvarhúsi Kárahnjúkavirkjunar/Fljótsdalsstöðvar voru bergfærslur einnig mældar með stangarfærslumælum og nákvæmnismálböndum, sjá mynd 3.7. Í stöð 47 mældust mestar færslur í hæð 25 m.y.s. eða um 170 mm, sjá mynd 3.8. Eins og í stöðvarhúsi Blönduvirkjunar reyndust mældar færslur ögn meiri en það sem reiknað hafði verið út í líkani sem gert var með einingaraðferðinni (Loftsson o.fl., 2005).

3.2. Áhrif bergspenna á jarðgangarþversnið í íslensku bergi



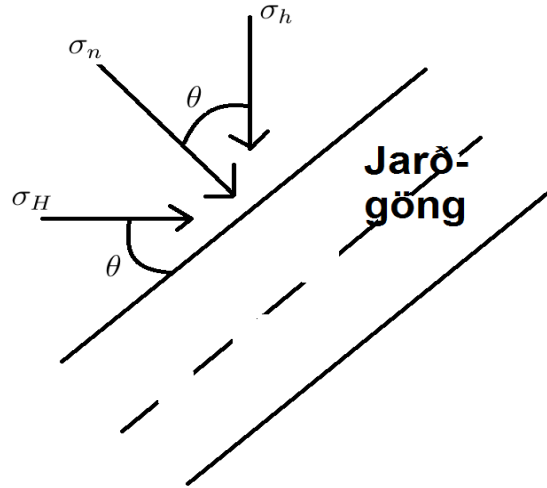
Mynd 3.7: Uppsetning stangarfærslumæla og nákvæmnismálbanda í stöð 47 í stöðvarhúshelli Fljótsdalsstöðvar (Loftsson o.fl., 2005).



Mynd 3.8: Niðurstöður færslumælinga í stöð 47 í stöðvarhúsi Fljótsdalsstöðvar. Langmestar færslur eru í hæð 25 m.y.s. (Loftsson o.fl., 2005).

3. Jarðfræði Íslands

Í tvívíðri greiningu eins og gerð var í þessum kafla er heppilegast þegar k -stuðullinn er sem næst 1,0. Ein leið til að ná því fram er að breyta stefnu bergrúmsins því láréttar spennur eru ekki þær sömu allar áttir, sjá mynd 3.9. Það getur þó verið erfitt að breyta stefnu jarðganga sem ætlað er að tengja saman tvo staði en fyrir stöðvarhúshella er það auðveldara.



Mynd 3.9: Planmynd af jarðgöngum. Örvarnar sýna láréttar höfuðspennur auk normalspenna sem verka þvert á göngin.

Normalspennan σ_n sem sýnd er á mynd 3.9 er sú lárétta spenna sem notast er við í tvívíða líkaninu. Hún er skilgreind sem (Das, 2010):

$$\sigma_n = \frac{\sigma_h + \sigma_H}{2} + \frac{\sigma_h - \sigma_H}{2} \cos 2\theta \quad (3.5)$$

þar sem σ_H og σ_h eru hæstu og lægstu lárétta spennur og θ er hornið milli stefnu σ_H og stefnu jarðganga. Þar sem láréttar spennur eru skilgreindar sem hlutfall af lóðrétum spennum með k -stuðlum eins og gert er í jöfnu (2.2) þá má umskrifa jöfnu (3.5) sem:

$$k_n = \frac{k_{min} + k_{max}}{2} + \frac{k_{min} - k_{max}}{2} \cos 2\theta \quad (3.6)$$

4. Aðferðir til bergspennumælinga

Staðbundnar bergspennur (*e. in situ stresses*) eru mjög breytilegar eftir staðsetningu og ráðast að stórum hluta af jarðfræðilegri sögu þess bergs sem verið er að skoða. Ákvarðanir á staðbundnum bergspennum byggðar á fræðum eingöngu eru ekki taldar áreiðanlegar. Því er æskilegt að geta farið á þann stað sem kanna á og mæla hverjar raunverulegar spennur eru, sér í lagi við hönnun stærri neðanjarðarmannvirkja (“The Development of Rock Engineering”, 2015). Oft er spennuástand í bergi ekki mælt heldur einungis áætlað út frá forsendum sem menn gefa sér og oft dugar það. En engu að síður, því meiri og ítarlegri sem forrannsóknir vegna fyrirhugaðra framkvæmda neðanjarðar eru, því færri óvissuþættir verða í verkinu og er þá m.a. hægt að gera áreiðanlegri framkvæmdar- og kostnaðaráætlanir.

Til eru ýmsar aðferðir til mælinga á bergspennum og má skipta þeim í tvo flokka, yfirborðsmælingar og djúpmælingar. Yfirborðsmælingar ná til lítils svæðis á litlu dýpi og mæla spennur í ákveðnum punkti. Dæmi um slíkar aðferðir eru *yfirborun* og *plötutjökkun*. Yfirborun má svo enn frekar skipta í tvívíða og þrívíða yfirborun. Til djúpmælinga má telja *vökvaþrýstipróf* (Birgir Jónsson, 1984). Hér verður fjallað nánar um þessar þrjár aðferðir.

4.1. Yfirborun

Spennumælingar með yfirborunaraðferð (*e. overcoring*) er notuð til að áætla staðbundnar spennur í þrjár stefnur, lóðrétta og láréttar. Hugmyndafræðin á bak við yfirborunaraðferðina er að einangra bergsýni að hluta til eða í heilu lagi og mæla færslurnar (streitur) sem verða í sýninu þegar það hefur verið losað frá bergmassanum. Niðurstöður úr streitumælingunum eru svo notaðar til að reikna út spennuástandið (Reinecker o.fl., 2008). Við útreikning á spennum þarf fjáðurstuðull E og Poisson's hlutfall ν bergsins að vera þekkt og er það ákvarðað á tilraunastofu. Við ákvörðun þessara stuðla er gert ráð fyrir samfelldu og einsleitu bergsýni og að það hegði sér elastískt (Klasson o.fl., 2002). Hafa þarf í huga að svæðið næst gangaþversniði hefur orðið fyrir áhrifum af myndun bergrúmsins og hafa spennur þar því endurdreifst og lýsa þær þess vegna ekki staðbundnum spennum eins og þær voru fyrir myndun bergrúmsins. Yfirborun flokkast sem yfirborðsmæling og hana er ekki hægt að framkvæma í mikilli fjarlægð frá yfirborði jarðar eða gangaþversniðs. Því er framkvæmd yfirborunar ákjósanlegust inni í sjálfu bergrúminu sem krefst þess að jarðgangagerðin sé þegar hafin. Miðað er við að þegar fjarlægð frá yfirborði þversniðs er

4. Aðferðir til bergspennumælinga

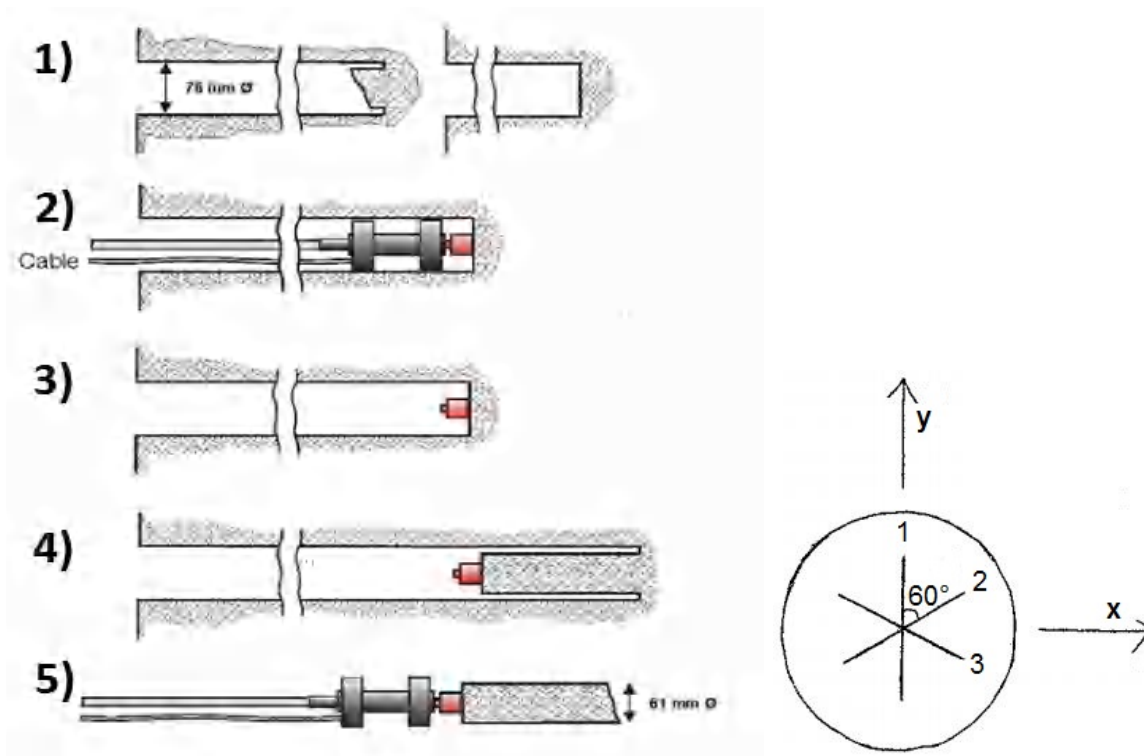
orðin meiri en sem nemur einu þvermáli ganganna þá er bergið ekki lengur á áhrifasvæði bergrúmsins (Kim & Franklin, 1987). Áður fyrr var ekki óalgengt að gerð voru könnunargöng með litlu þversniði til að geta mælt staðbundnar spennur á því dýpi sem áhugi var á að kanna (Haimson, 1977). Það var þó bæði dýrt og tímafrekt. Ný tækni til spennumælinga eins og vökvaprýstipróf, sem lýst er í kafla 4.2, hefur gert gerð könnunarganga í þessum tilgangi óþarfa.

Spennumælingar með yfirborun geta verið bæði tvívíðar (2D) og þrívíðar (3D) (Hagen, 2015). Í grunninn er þetta sama aðferðin en þær skila þó mismiklum upplýsingum og stundum hentar önnur aðferðin betur en hin. Hér verða þessar aðferðir skoðaðar nánar.

4.1.1. Tvívíð yfirborun

Í 2D yfirborun eru bergspennur þvert á stefnu borholu ákvarðaðar og er það gert út frá fjaðureiginleikum bergsins og breytingum á þvermáli borholu eftir yfirborun. Til að hægt sé að reikna þrívítt spennusvið bergsins er nauðsynlegt að gera yfirborunarmælingar í þremur ósamsíða holum. Borholur fyrir 2D yfirborun eru mjög sjaldan lengri en 30 m (Kim & Franklin, 1987).

Mynd 4.1 sýnir hefðbundin skref í 2D yfirborunaraðferð.



Mynd 4.1: T.v.: Hefðbundin skref í 2D yfirborunaraðferð (Dahle & Larsen, 2005).

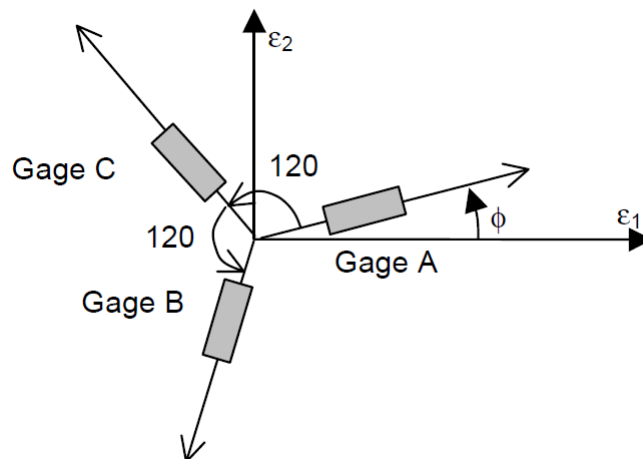
T.h.: Einföld planmynd af streitumæli (rósettu) með þremur nemum. Nemarnir mæla streitur í stefnur með 60° millibili.

Skýringar við skrefin á mynd 4.1 eru (Dahle & Larsen, 2005), (Kim & Franklin, 1987):

1. Hola er boruð á ákveðið dýpi, algengt þvermál er 76 mm en getur verið allt upp í 150 mm. Kjarninn er fjarlægður og endi holunnar er jafnaður út og gerður sléttur.
2. Mælibúnaði, í laginu eins og hurðastoppari, með litlum streitunemum (rósetta) er komið fyrir í enda holunnar og hann límduð þar fastur.
3. Þegar mælibúnaðurinn er fastur í botni holunnar er gerð fyrsta mæling til að fá núllstillingu. Innsetningarbúnaðurinn er fjarlægður og tilbúinn fyrir yfirborun.
4. Nýr kjarni er boraður með sama þvermáli og upphafleg borhola, t.d. 76 mm, þannig að spennur losna í botni holunnar. Samsvarandi streitur í enda kjarnans eru mældar með streitunemunum (rósettunni).
5. Kjarninn er gripinn og fjarlægður. Strax að því loknu er gerð ný streitumæling. Með niðurstöðum streitumælinganna er svo hægt að reikna út spennur í planinu þvert á borholuna þegar fjadurstuðull og Poisson's hlutfall hefur verið ákvarðað.

Spennuútreikningar úr 2D yfirborun

Á streitumæli (rósettu) eins og sýndur er á mynd 4.2 er hornið á milli nemanna 120° en í raun er hornið á milli mælinga hveftra tveggja nema 60° þar sem nemi B mælir streitur í áttina mitt á milli nema A og C o.s.frv.



Mynd 4.2: Streitumælir / rósetta með þremur streitunemum (Bachau & Craig, 2009).

4. Aðferðir til bergspennumælinga

Höfuðstreiturnar, ε_1 og ε_2 , má reikna út frá streitugildum af nemum A, B og C sem (Bachau & Craig, 2009):

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_A + \varepsilon_B + \varepsilon_C}{3} \pm \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_A - \varepsilon_B)^2 + (\varepsilon_B - \varepsilon_C)^2 + (\varepsilon_C - \varepsilon_A)^2} \quad (4.1)$$

Hornið ϕ á milli streitunema A og höfuðstreitunnar ε_1 er skilgreint sem:

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{3}(\varepsilon_C - \varepsilon_B)}{2\varepsilon_A - \varepsilon_B - \varepsilon_C} \right] \quad (4.2)$$

Þegar höfuðstreiturnar eru þekktar og fjaðurstuðull og Poisson's hlutfall einnig þá má reikna höfuðspennurnar σ_1 og σ_2 skv. jöfnum (4.3) og (4.4):

$$\sigma_1 = \frac{E}{(1 - \nu^2)} (\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) \quad (4.3)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{(1 - \nu^2)} (\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1) \quad (4.4)$$

Við spennuútreikningana er gert ráð fyrir elastískri hegðun bergsins.

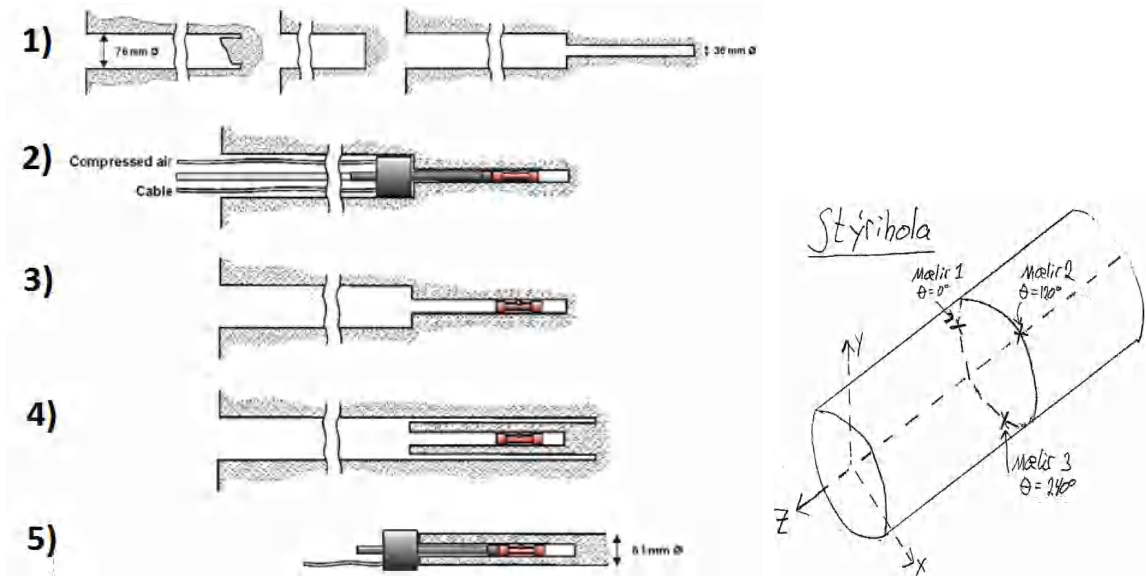
Nú þegar höfuðspennurnar eru þekktar þá má með einfaldri hornafræði reikna út hverjar lóðréttar og láréttar spennur eru hornrétt á stefnu borholunnar.

Kostir og gallar 2D yfirborunar

Kostir 2D yfirborunar eru m.a. þeir að stærð yfirboraða kjarnans, sem notaður er til að ákvarða elastíska eiginleika bergsins, skiptir ekki máli. Það kemur því ekki að sök þó yfirborunin sé gerð í sprungnu bergi. Aðferðina má nota í bæði lóðréttum og láréttum borholum. Bleyta í borholunni kemur ekki að sök við framkvæmd mælinganna (Hagen, 2015). Gallar við 2D yfirborun eru að einungis er hægt að mæla spennur í planinu þvert á borholuna og það eru ekki endilega hæstu eða lægstu spennurnar. Í tilfellum þar sem reikna á þrívítt spennuástand þá þarf að yfirbora í þremur ósamsíða holum. Gæta þarf þess að mælingarnar séu gerðar nógu langt inni í berginu til að niðurstöðurnar séu ekki „truflaðar“ af breyttu spennuástandi næst bergrúminu.

4.1.2. Þrívíð yfirborun

Með 3D yfirborun er unnt að ákvarða þrívítt spennuástand í bergi í einni og sömu borholunni. Mynd 4.3 sýnir hefðbundin skref í 3D yfirborunaraðferð.

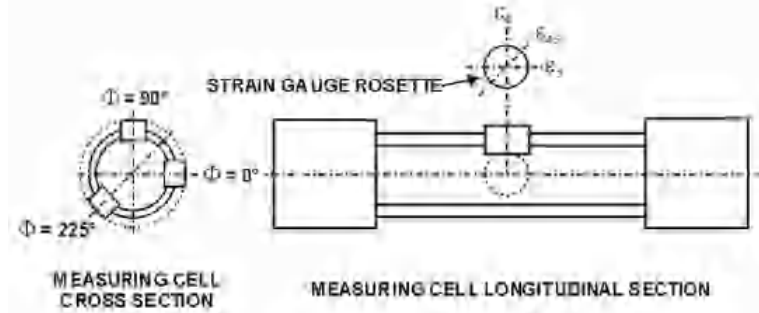


Mynd 4.3: T.v.: Hefðbundin skref í 3D yfirborunaraðferð (Dahle & Larsen, 2005).
T.h.: Ítarleg mynd af stýriholu sem sýnir staðsetningu streitumæla.

Skýringar við mynd 4.3 eru (Dahle & Larsen, 2005):

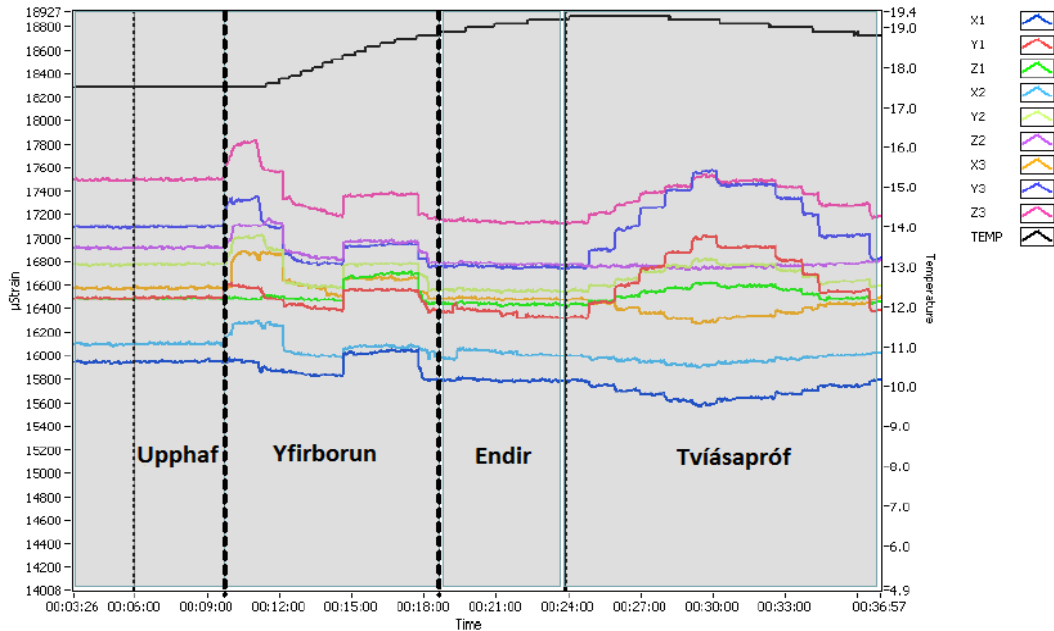
1. Hóla er boruð á ákveðið dýpi, algengt þvermál er 76 mm. Endi holunnar er jafnaður út og stýrihóla svo boruð u.þ.b. 30 cm áfram með minna þvermáli, t.d. 36 mm.
2. Sérstakur búnaður er notaður til að koma fyrir þremur streitumælum (rósettum) í stýriholunni. Hver um sig er með 3-4 nemum sem mæla streitur í mismunandi stefnu og er bilið milli þeirra iðulega haft jafnt ($90 - 120^\circ$) um hringlaga yfirborðið. Sjá myndir 4.3 (til hægri) og 4.4.
3. Streitumælarnir (rósettarnar) hafa nú verið festir í holunni og gerð er fyrsta mæling til að fá núllstillingu. Innsetningarbúnaðurinn er síðan fjarlægður og mælitækið er tilbúið fyrir yfirborun.
4. Minni hólan er yfirboruð með stærra þvermálinu, og veldur það spennulosun. Samsvarendi streitur eru mældar með streitumælunum.
5. Kjarninn er gripinn og svo fjarlægður. Strax að því loknu er gerð ný streitumæling. Með niðurstöðum streitumælinganna má reikna út spennur í allar stefnur þegar fjaðurstuðull og Poisson's hlutfall bergkjarnans hefur verið ákvarðað í tvíásaprófi.

4. Aðferðir til bergspennumælinga



Mynd 4.4: Þversnið og langsnið af mælitækinu inni í stýriholunni. Streitumælum (rósettum) sem hver um sig hefur 3-4 streitunema, er komið fyrir umhverfis tækið (Dahle & Larsen, 2005).

Tvíásapróf (e. *biaxial test*) er notað til að ákvarða elastíska eiginleika bergs sem notaðir eru til að reikna út staðbundnar bergspennur með 3D yfirborunaraðferð. Aðferðin felst í að yfirboraði kjarninn er látinn í þrýstirými og sett á hann tvíása álag nokkrum sinnum. Streitumælarnir eru enn á sínum stað inni í kjarnanum í þessu ferli. Elastískir eiginleikar bergsins eru svo reiknaður út frá mældum spennu-streitu ferlum. Þetta má allt saman gera mjög fljótt eftir sjálfa yfirborunina og heldur bergið því ennþá sínu upphaflega raka-stigi (Ben Ouanas o.fl., 2010). Á mynd 4.5 er sýnt dæmi um aflestur af streitunemum rósettanna í gegnum allt ferli 3D yfirborunar, þ.e. streitur sem fall af tíma.



Mynd 4.5: Dæmi um streitumælingar úr 3D yfirborun. Streiturnar sem til verða við spennulosun vegna yfirborunarinnar eru lesnar sem mismunur streitugildanna við upphaf og enda yfirborunar. Mælarnir eru ennþá á bergkjarnanum þegar hann er fjarlægður úr borholunni og settur í tvíásapróf (Hagen, 2015).

Spennuútreikningar úr 3D yfirborun

Streitan sem mælist á hverjum nema á hverri og einni rósettu er skilgreind sem (Kim & Franklin, 1987):

$$\varepsilon_{ij} = A_x \sigma_x + A_y \sigma_y + A_z \sigma_z + A_{yz} \tau_{yz} + A_{xz} \tau_{xz} + A_{xy} \tau_{xy} \quad (4.5)$$

Þar sem i er númer hvers streitumælis/rósettu og j er númer hvers streitunema á hverri rósettu. σ og τ eru spennur og skúfuspennur í staðbundnu hnitakerfi þar sem z -ásinn er samsíða stefnu borholunnar og x - og y -ásarnir eru hornréttir á stefnu borholunnar. A -stuðlarnir eru skilgreindir sem:

$$A_x = A_y = \frac{1 - \nu}{2E} - \frac{1 + \nu}{2E} [\cos 2\omega - (1 - \nu^2) (1 - \cos 2\omega) \cos 2\theta] \quad (4.6)$$

$$A_z = \frac{1 - \nu}{2E} + \left(\frac{1 + \nu}{2E} \cos 2\omega \right) \quad (4.7)$$

$$A_{yz} = \frac{2(1 + \nu)}{E} \sin(2\omega \cos \theta) \quad (4.8)$$

$$A_{xz} = \frac{-2(1 + \nu)}{E} \sin(2\omega \sin \theta) \quad (4.9)$$

$$A_{xy} = \frac{-2(1 - \nu^2)}{E} (1 - \cos 2\omega) \sin 2\theta \quad (4.10)$$

Þar sem ν og E eru Poisson's hlutfall og fjaðurstuðull bergsins, ω er horn streitunema hverrar rósettu m.t.t. z -ássins (jákvætt horn er skilgreint rangsælis), sjá mynd 4.1. θ er hornið á staðsetningu streitumælis/rósettu á yfirborði borholunnar m.t.t. x - eða y -áss, sjá mynd 4.3.

Jöfnu (4.5) má skilgreina á vigurformi sem:

$$\{\varepsilon\} = [A] \{\sigma\} \quad (4.11)$$

4. Aðferðir til bergspennumælinga

Í tilfellinu þegar fjöldi rósetta er þrjú og fjöldi streitunema á hverri rósettu er einnig þrjú þá verða mæld streitugildi í allt níu talsins. Ítarlegri útlistun á jöfnu (4.11) verður því:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{32} \\ \varepsilon_{33} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{x,1} & A_{y,1} & A_{z,1} & A_{yz,1} & A_{xz,1} & A_{xy,1} \\ A_{x,2} & A_{y,2} & A_{z,2} & A_{yz,2} & A_{xz,2} & A_{xy,2} \\ A_{x,3} & A_{y,3} & A_{z,3} & A_{yz,3} & A_{xz,3} & A_{xy,3} \\ A_{x,4} & A_{y,4} & A_{z,4} & A_{yz,4} & A_{xz,4} & A_{xy,4} \\ A_{x,5} & A_{y,5} & A_{z,5} & A_{yz,5} & A_{xz,5} & A_{xy,5} \\ A_{x,6} & A_{y,6} & A_{z,6} & A_{yz,6} & A_{xz,6} & A_{xy,6} \\ A_{x,7} & A_{y,7} & A_{z,7} & A_{yz,7} & A_{xz,7} & A_{xy,7} \\ A_{x,8} & A_{y,8} & A_{z,8} & A_{yz,8} & A_{xz,8} & A_{xy,8} \\ A_{x,9} & A_{y,9} & A_{z,9} & A_{yz,9} & A_{xz,9} & A_{xy,9} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Í töflu 4.1 eru gefin upp horn hvers streitunema og tilsvareandi rósettu, ω og θ , sem verið er að skoða hverju sinni.

Tafla 4.1: Horn sem notuð eru í jöfnum (4.6) - (4.10) við skilgreiningu á streitugildi hvers nema.

	ε_{11}	ε_{12}	ε_{13}	ε_{21}	ε_{22}	ε_{23}	ε_{31}	ε_{32}	ε_{33}
ω [°]	0	60	120	0	60	120	0	60	120
θ [°]	0	0	0	120	120	120	240	240	240

Í jöfnunum hér á undan eru spennuþættirnir óþekktir en þá má reikna út með því að einangra spennuvigurinn út úr jöfnu (4.11). Þar sem um ofákvarðaða fylkjajöfnu er að ræða þá verður spennuvigurinn skilgreindur sem:

$$\{\sigma\} = ([A]^T [A])^{-1} [A]^T \{\varepsilon\} \quad (4.13)$$

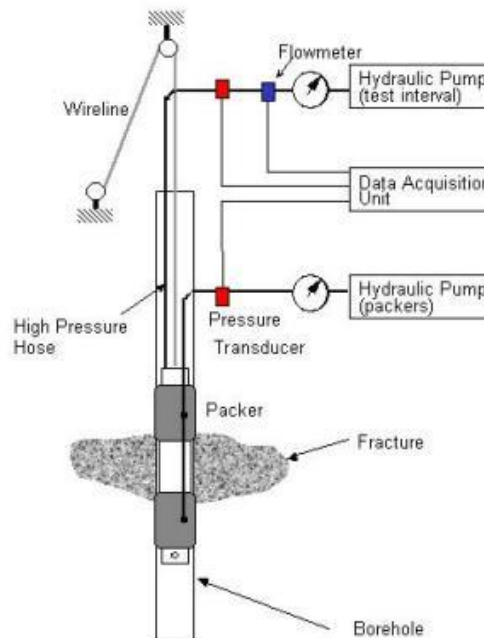
Höfuðspennurnar σ_1 , σ_2 , σ_3 og stefnur þeirra eru svo reiknaðar út frá spennunum í staðbundna x -, y - og z -hnitakerfinu sem sýndar hafa verið hér fyrir ofan. Að lokum má ákvarða lóðréttar spennur (σ_v) og hæstu og lægstu láréttu spennur (σ_H og σ_h) með hornafræði út frá höfuðspennunum.

Kostir og gallar 3D yfirborunar

Kostir við 3D yfirborun eru að hægt er að mæla þrívítt spennuástand bergsins í einni og sömu holunni. Gallar við aðferðina eru að bergið þarf að vera af vissum gæðum og má ekki vera of sprungið. Erfitt er að nota þessa aðferð ef spennurnar eru of háar. Einnig verður borholan að vera alveg þurr (Hagen, 2015). Líkt og í 2D yfirborun þá þarf að gæta þess að mælingarnar séu gerðar nógu langt inni í berginu til að niðurstöðurnar séu ekki „truflaðar“ af breyttu spennuástandi næst bergrúminu.

4.2. Vökvaþrýstipróf

Bergspennumælingar með vökvaþrýstiprófi (e. *Hydraulic Fracturing Test*) fara þannig fram að boruð er hola og hluti af henni (ca. 1 m) einangraður með gúmmíþakningum efst og neðst, sjá mynd 4.6. Vatni er dælt inn í einangraða hlutann þangað til þrýstingurinn er orðinn svo mikill að sprunga myndast í berginu. Þrjár þættir eru mældir með vökvaþrýstiprófi, þ.e. vökvaþrýstingurinn þegar sprungan myndast (P_c), sá vökvaþrýstingur sem þarf til að opna sprunguna aftur (P_r) og innskotsþrýstingurinn til að halda sprungunni opinni (P_{si}). Út frá þeim niðurstöðum má svo reikna út stærð og stefnu höfuðspennanna. Sá hluti borholunnar sem er einangraður má ekki vera sprunginn að neinu leyti áður en prófið fer fram, því að markmið prófsins er að búa til nýja sprungu. Það getur þó oft reynst erfitt að finna eins metra langan hluta af borholunni sem er algjörlega laus við sprungur (Hudson & Harrison, 2002).



Mynd 4.6: Uppsetning búnaðar við framkvæmd vökvaþrýstiprófs (Mining Measurements Services, 2010).

4.2.1. Kirsch jöfnur

Spennuútreikningar umhverfis hringlaga holu/bergrúm voru fyrst gerðir af Kirsch og er þá gert ráð fyrir línulega elastískri hegðun bergsins. Jöfnur Kirsch eru notaðar til grundvallar við útreikning á bergspennum í vökvaþrýstiprófi. Þær lýsa tangential-, radial- og skúfspennum á eftirfarandi hátt (Li, 2010):

4. Aðferðir til bergspennumælinga

Tangential spennur:

$$\sigma_{\theta} = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (4.14)$$

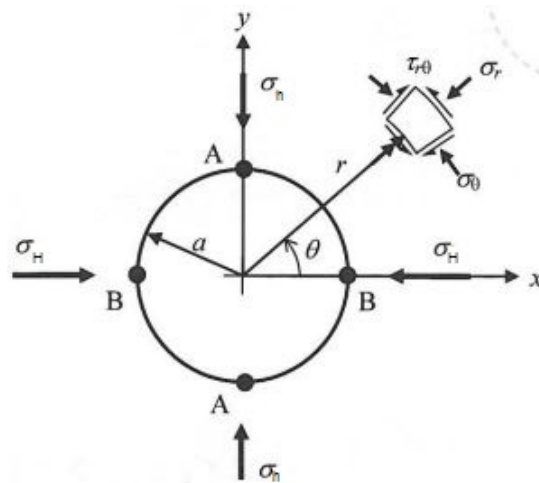
Radial spennur:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (4.15)$$

Skúfspennur:

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \quad (4.16)$$

Þar sem σ_h og σ_H eru minnsta og stærsta höfuðspenna í lárétta átt, a er radiús borholunnar, r er fjarlægð frá miðju borholu að þeim stað sem reikna á spennurnar í og θ er hornið mælt frá stefnu σ_H , sjá mynd 4.7.



Mynd 4.7: Sýnir hvernig radial-, tangential- og skúfspennur verka í hringlaga opi (Li, 2010).

Þegar horft er á jaðar holunnar á mynd 4.7, þ.e. þegar $r = a$, þá eru tangential spennur stærstar í punktum A ($\theta = 90^\circ$ og 270°) og minnstar í punktum B ($\theta = 0^\circ$ og 180°). Jafna 4.14 einfaldast því og verður (Li, 2010):

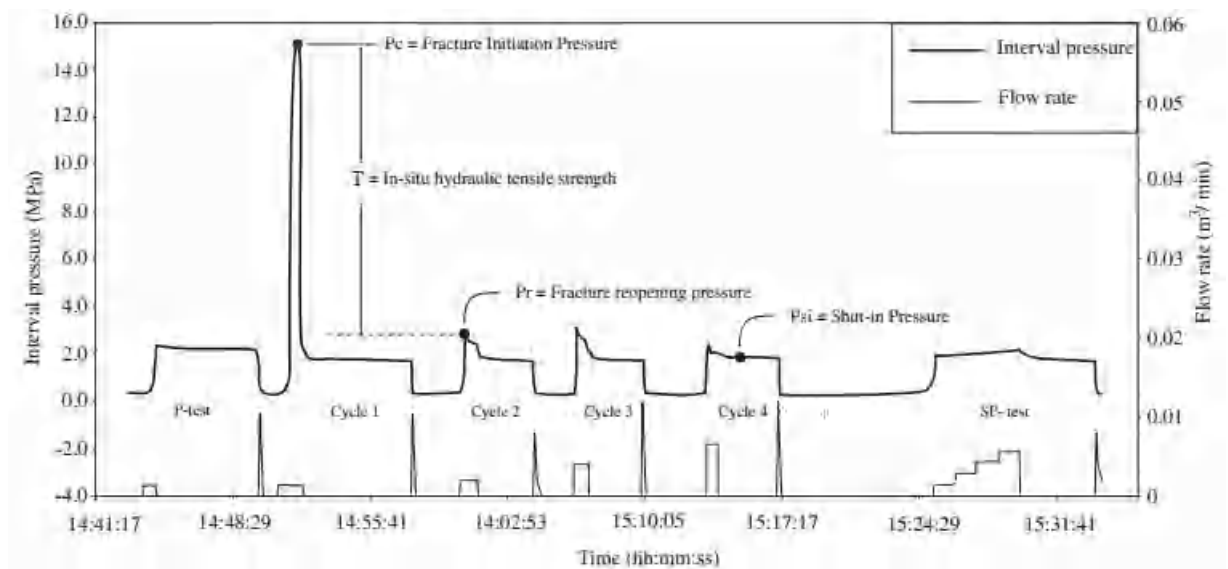
$$\sigma_{\theta,max} = \sigma_{\theta,A} = 3\sigma_H - \sigma_h \quad (4.17)$$

$$\sigma_{\theta,min} = \sigma_{\theta,B} = 3\sigma_h - \sigma_H \quad (4.18)$$

Radial- og skúfspennur verða núll.

Jarðgöng eru sjaldan hringlaga og bergið umhverfis þau er nánast aldrei einsleitt og elastískt. Kirsch jöfnurnar duga því ekki einar og sér til að áætla bergspennur umhverfis berg-rúm en þær gefa vísbendingar um þær. Ef um borholu með einungis nokkra sentimetra þvermál er að ræða þá geta jöfnur Kirsch gefið nokkuð raunhæfa mynd af spennusviðinu umhverfis holuna og eru þær því notaðar til grundvallar í spennuútreikningum í vökvaprýstiprófi.

4.2.2. Spennuútreikningar



Mynd 4.8: Ferlið í vökvaprýstiprófi (Ziaie Moayed o.fl., 2012).

Í vökvaprýstiprófi er venjan að ganga út frá því að borholan sé samsíða stefnu einnar höfuðspennunnar. Kítískur vökvaprýstingur (P_c) er sá þrýstingur sem er í einangraða hluta holunnar þegar ný sprunga myndast, sjá mynd 4.8. Sprungan myndast í þá átt sem hæsta lárétta spenna liggur. Kítískur vökvaprýstingur er því í raun eins og lægsta tangential spenna sem lýst er með jöfnu (4.18) en búið að laga að raunverulegum aðstæðum (Ziaie Moayed o.fl., 2012).

$$P_c = 3\sigma_h - \sigma_H + T - u \quad (4.19)$$

Þar sem σ_h og σ_H eru minnstu og stærstu höfuðspennur í lárétta átt, T er togstyrkur bergsins og u er grunnvatnsþrýstingur. Togstyrkurinn er mismunurinn á þeim vökvaprýstingi sem þarf til að mynda sprunguna (P_c) og þeim þrýstingi sem þarf til að opna sprunguna aftur (P_r), sjá eftirfarandi jöfnu og mynd 4.8.

$$T = P_c - P_r \quad (4.20)$$

Vökvaprýstingurinn sem þarf til að opna sprunguna að nýju (P_r) er

$$P_r = 3\sigma_h - \sigma_H - u = P_c - T \quad (4.21)$$

4. Aðferðir til bergspennumælinga

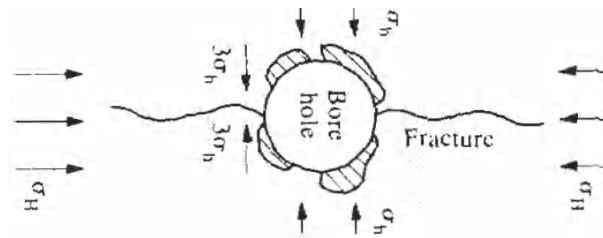
Innskotsþrýstingurinn, P_{si} , (*e. shut-in pressure*) er sá þrýstingur sem þarf til að halda sprungunni opinni en hann jafngildir lægstu láréttu höfuðspennu.

$$\sigma_h = P_{si} \quad (4.22)$$

Hæstu láréttu höfuðspennu má skilgreina sem

$$\sigma_H = 3\sigma_h - P_r - u \quad (4.23)$$

Lóðréttar spennur eru ekki mældar í vökvaþrýstiprófi heldur er einungis gert ráð fyrir að þær vaxi línulega með auknu dýpi skv. jöfnu (2.1).



Mynd 4.9: Planmynd sem sýnir sprungumyndun og láréttar höfuðspennur (Hudson & Harrison, 2002).

Sprungan sem myndast í vökvaþrýstiprófi er samsíða hæstu höfuðspennu, sjá mynd 4.9. Halli sprungunnar og stefna er mæld með áttavita og afsteypupakkara. Afsteypupakkarinn er gerður úr mjúku gúmmí eða teflon og er honum þrýst út í borholuveggina með miklum þrýstingi og honum haldið þannig um nokkra stund. Vegna þrýstingsins, nær pakkarinn að móta yfirborð holunnar, þar á meðal sprunguna og aðrar ójöfnur. Meðan á þessu stendur er áttaviti settur niður í holuna og hann getur aðeins sest á pakkarann á einn veg. Tekin er mynd af áttavitanum og þannig fást upplýsingar um raunverulega stefnu pakkarans og sprungnanna (Birgir Jónsson, 1984).

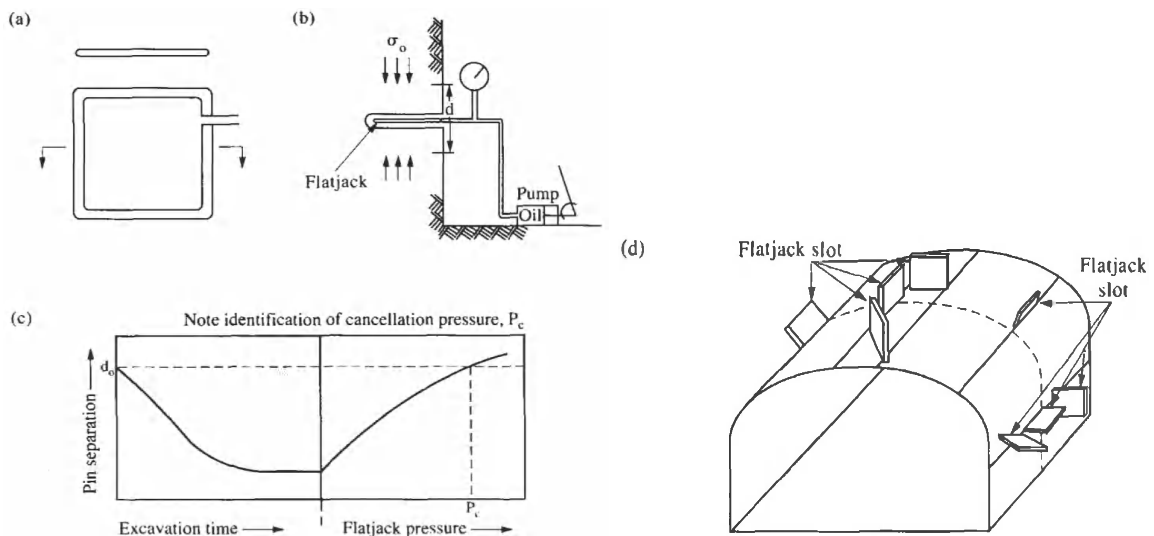
Kostir og gallar vökvaþrýstiprófs

Helstu kostir við vökvaþrýstipróf eru að það mælir minnstu höfuðspennur beint, þ.e. ekki þarf að umreikna streitur yfir í spennur. Lítil takmörk eru á því hversu djúpt er hægt að bora borholu fyrir vökvaþrýstipróf. Því er hægt að gera spennumælingar á miklu dýpi, eða því dýpi sem fyrirhugað mannvirki á að vera. Þetta er hægt að gera frá yfirborði jarðar og er aðferðin því heppileg þegar um forrannsóknir er að ræða og framkvæmdir við sjálft mannvirkið ekki hafnar. Hugsanlegt grunnvatn í holunni hefur engin áhrif á framkvæmd og niðurstöður vökvaþrýstiprófs. Helstu gallar við vökvaþrýstipróf eru að það gefur einungis minnstu höfuðspennur. Stærstu höfuðspennur þarf að reikna út skv. jöfnu (4.23). Gæði bergsins þurfa að vera nægilega góð til að hægt sé að framkvæma mælingar, þ.e. sprungur í þeim hluta borholunnar sem prófað er í þurfa að vera í algjöru lágmarki (Hagen, 2015).

4.3. Plötutjökkun

Plötutjökkunarpróf (*e. Flatjack test*) er ein elsta aðferðin sem vitað er um til að mæla staðbundnar bergspennur (Sankar, 2011). Í plötutjökkunarprófi eru tveir pinnar boraðir í gangavegginn og fjarlægðin á milli þeirra mæld. Rifa er söguð í bergið á milli pinnanna. Ef normalspennurnar á þessum stað eru þrýstispennur þá munu pinnarnir færast að hvor öðrum þegar rifa er söguð. Plötutjakkur samanstendur af tveimur málmplötum ($300 \times 300 \text{ mm}$) sem soðnar eru saman á jöðrunum en skilið er eftir smá op þar sem hægt er að dæla inn vökva, sjá myndir 4.10 og 4.12. Flatjack plöturnar eru svo grautaðar fastar inn í rifuna. Þegar vökvaþrýstingur er settur á plöturnar munu pinnarnir færast tilbaka að nýju. Gert er ráð fyrir að þegar fjarlægðin á milli pinnanna er orðin sú sama og áður en rifa var söguð, þá sé þrýstingurinn á plöturnar orðinn sá sami og normalspennurnar sem fyrir voru (Hudson & Harrison, 2002). Einnig er gert ráð fyrir elastískri hegðun bergsins á milli pinnanna (Sankar, 2011).

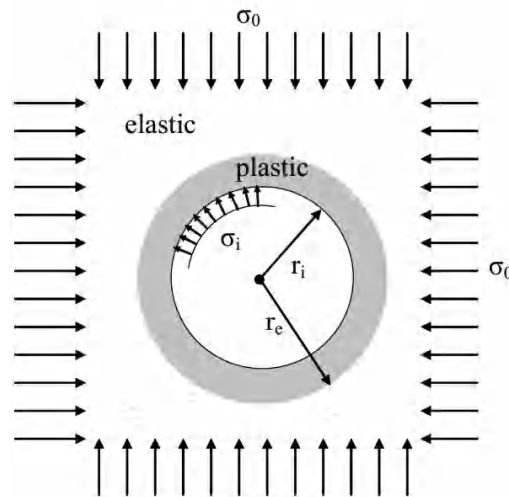
Best er að dreifa prófunum sem mest um jaðar bergrúmsins. Niðurstöður spennumælinga verða mismunandi eftir því hvar á jaðrinum mælingarnar eru gerðar, þ.e. hvort þær eru í þaki, veggjum eða botni bergrúms. Til að geta túlkað niðurstöður plötutjökkunarprófs á réttan hátt, er æskilegt að þekkja líklega spennudreifingu umhverfis bergrúmið (Hudson & Harrison, 2002).



Mynd 4.10: Uppsetning plötutjökkunarprófs. (a) Plötutjakkur. (b) Uppsetning prófs. (c) Fjarlægð milli pinna sem fall af tíma. (d) Plötutjökkunarpróf í vinnslu (Hudson & Harrison, 2002).

Kostir og gallar plötutjökkunarprófs:

Kostir við plötutjökkunarpróf eru að það gefur ágæta nálgun á normalspennum við yfirborð ganganna sem prófið er framkvæmt í (Hudson & Harrison, 2002). Hægt er að framkvæma plötutjökkunarpróf með tiltölulega einföldum búnaði sem þarf ekki að vera mjög dýr og sérhæfður. Gallar við plötutjökkunarpróf eru að það gefur einungis upp normalspennur þvert á rifuna sem söguð er. Því þarf að framkvæma að lágmarki 6 próf í mismunandi stefnur til að ákvarða þrívítt spennuástand (Sankar, 2011). Framkvæmdir við viðkomandi jarðgöng / neðanjarðarmannvirki þurfa að vera hafnar því mælingarnar eru gerðar inni í sjálfum göngunum. Plötutjökkunarpróf er því ekki hægt að framkvæma við forrannsóknir á byggingu neðanjarðarmannvirkis. Bergið sem er næst því bergrúmi sem búið er að grafa út, er yfirleitt skemmt eftir útgröftinn og er því líklegt til að haga sér plastið (Sankar, 2011), sjá mynd 4.11. Niðurstöður plötutjökkunarprófs gefa því ekki endilega dæmigerða mynd af bergspennum á því dýpi sem mælt er nema við bergveggina sjálfa.



Mynd 4.11: Bergið næst bergrúmi er plastið en lengra í burtu er það elastískt (Erlingsson, 2013b).



Mynd 4.12: Plötur í plötutjökkunarprófi (Eberhardt, 2004).

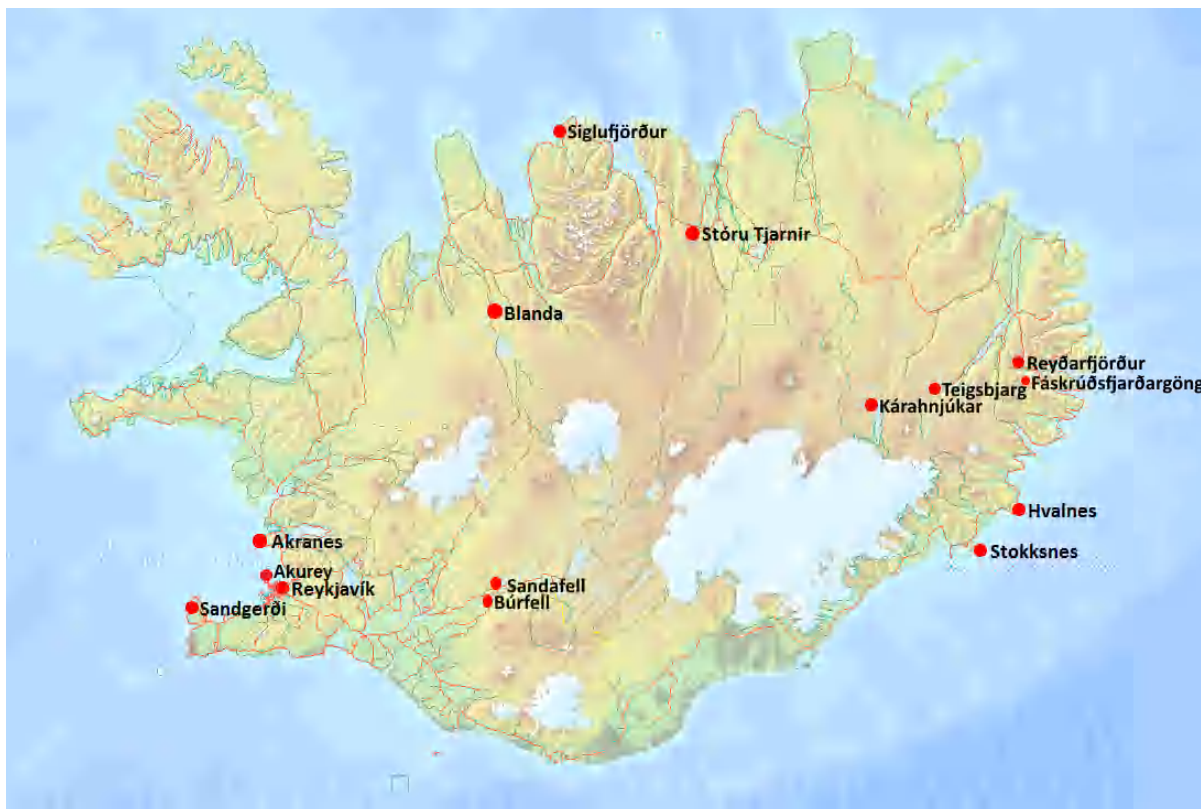
4.4. Samanburður á aðferðum

Af þeim aðferðum til bergspennumælinga sem fjallað hefur verið um í þessum kafla þá verður vökvaþrýstipróf að teljast heppilegasta aðferðin þegar kemur að forrannsóknnum áður en framkvæmdir hefjast. Þeirri aðferð eru lítil takmörk sett á því á hversu miklu dýpi er hægt að framkvæma mælingar og er hægt að framkvæma hana frá yfirborðinu. Spennumælingar með yfirborunaraðferð þykja almennt nokkuð áreiðanlegar. Slíkar mælingar eru oftast gerðar tiltölulega nálægt yfirborði bergs, ofanjarðar eða inni í bergrúmi (Reinecker o.fl., 2008). Neðanjarðarmannvirki eru oftast á tuga eða hundruða metra dýpi og er framkvæmd yfirborunaraðferðarinnar því ákjósanlegust inni í sjálfu bergrúminu. Það krefst þess að sjálfsögðu að sjálf jarðgangagerðin sé hafin. Spennumælingar með yfirborunaraðferð henta því ekki vel í forrannsóknnum fyrir fyrirhugaðar framkvæmdir í bergi. Aftur á móti er yfirborun tilvalin aðferð til að fylgja eftir og sannreyna eldri mælingar og spálíkön sem gerð hafa verið í tölvuforritum. Yfirborunarmælingar fara alltaf fram nokkuð nálægt opnu bergrúmi og er því ekki endilega verið að mæla óhreyft spennuástand áður en bergrúmið var myndað. Almennt er ekki borað lengra en 30 m inn í bergið en sú fjarlægð er í mörgum tilfellum nógu löng til að niðurstöður mælinga verða ekki fyrir áhrifum af breyttu spennuástandi næst bergrúminu ef miðað er við að stærð áhrifasvæðis bergrúmsins nemi u.þ.b. einu þvermáli þess. Plötutjökkunarpróf gefur ekki upplýsingar um dæmigerðar spennur á tilteknu dýpi heldur einungis við jaðra bergrúmsins og þar hefur spennuástandið breyst mikið vegna myndunar bergsúmsins. Til að fá upplýsingar um allar höfuðspennur með plötutjökkunarprófi þá þarf að framkvæma sex slík próf. Algengustu aðferðir til mælinga á staðbundnum bergspennum í heiminum í dag eru *vökvaþrýstipróf og yfirborun*.

Nokkuð dýrt getur verið að framkvæma bergspennumælingar. Til að gefa hugmynd um kostnað við slíkar mælingar má nefna að skv. upplýsingum frá norsku rannsóknarstofnuninni SINTEF, þá er gróft mat á kostnaði við vökvaþrýstipróf og 2D yfirborun í einni holu á bilinu 350 - 400.000 NOK og 450 - 500.000 NOK fyrir 3D yfirborun. Þetta er þó mjög háð staðsetningu og fjölda þeirra mælinga sem á að framkvæma (*Simon Alexander Hagen, 2015. Munnleg heimild.*).

5. Bergspennur á Íslandi

Ekki hafa verið gerðar margar bergspennumælingar á Íslandi í gegnum tíðina og langt í frá í tengslum við allar neðanjarðarframkvæmdir. Bergspennumælingar krefjast dýrs og sérhæfðs tækjabúnaðar og hafa hingað til einungis verið gerðar af erlendum teyllum. Bandaríkjamadurinn Bezalel Haimson og Svíinn Nils Hast fóru fyrir mörgum mælingum á 7. og 8. áratug seinustu aldar, en svo voru bergspennumælingar ekki gerðar af neinu ráði að nýju fyrr en í kringum seinustu aldamót og þá í tengslum við stórframkvæmdir á Austurlandi. Voru þær gerðar af stofnununum *SINTEF* í Noregi og *Amberg Measuring Technique* í Sviss. Í töflu 5.1 eru taldir upp þeir staðir þar sem mælingar hafa farið fram á Íslandi og mynd 5.1 sýnir staðina á korti. Misjafnt er hversu góðar og aðgengilegar heimildirnar um mælingarnar eru og t.d. fundust ekki upplýsingar um niðurstöður mælinga í Strákagöngum við Siglufjörð þótt vitað sé að mælingar fóru þar fram.



Mynd 5.1: Staðir á Íslandi þar sem bergspennumælingar hafa farið fram.

5. Bergspennur á Íslandi

Tafla 5.1: Staðir þar sem bergspennur hafa verið mældar á Íslandi.

Ár	Staður	Aðferð ¹	Fjöldi mælinga	Dýptarbil [m]
1966	Siglufjörður ²	YB	-	-
1967	Búrfell	YB	7	75
1968	Hvalnes	YB	1	29
1968	Stokksnes	YB	1	30
1968	Akurey	YB	3	3 - 13
1968	Sandgerði	YB	1	4
1977	Reykjavík	VP	7	180 - 375
1979	Akranes	VP	1	100
1979	Blönduvirkjun	VP	5	100 - 170
1979	Stóru-Tjarnir	VP	1	100
1981	Reyðarfjörður	VP	24	52 - 576
1981	Sandafell	VP	5	134 - 149
1981	Teigsbjarg	VP	7	25 - 504
1998	Kárahjúkar	VP	13	40 - 163
1998	Teigsbjarg	VP	13	155 - 412
2004	Fáskrúðsfjarðargöng	YB	47	100 - 955
2005	Fljótsdalsstöð (Teigsbjarg)	YB	26	500

¹ YB = Yfirborun, VP = Vökvaþrýstipróf

² Litlar upplýsingar til um þessar mælingar.

5.1. Niðurstöður mælinga

Hér verður gerð grein fyrir niðurstöðum allra þekktra bergspennumælinga á Íslandi. Fylgt verður þeirri röð sem birtist í töflu 5.1 með þeirri undantekningu að ekki verður fjallað um mælingarnar á Siglufirði vegna skorts á upplýsingum um niðurstöður þeirra. Einnig verða staðirnir Hvalnes, Stokksnes, Akurey, Sandgerði, Akranes og Stóru Tjarnir teknir fyrir í lokin þar sem upplýsingar um mælingar á þeim stöðum voru ekki ítarlegar og fundust eingöngu í fylgiskjölum með skýrslum af mælingum á öðrum stöðum. Gerð verður grein fyrir gæðum á meðalstefnu σ_H skv. skilgreiningu WSM í töflu 2.1. Mælingar á lóðréttum spennum voru ekki skoðaðar sérstaklega og er því í öllum tilfellum gert ráð fyrir að lóðrétt spennna fylgi jöfnu (2.1) þar sem $\gamma = 0,027^{MN}/m^3$.

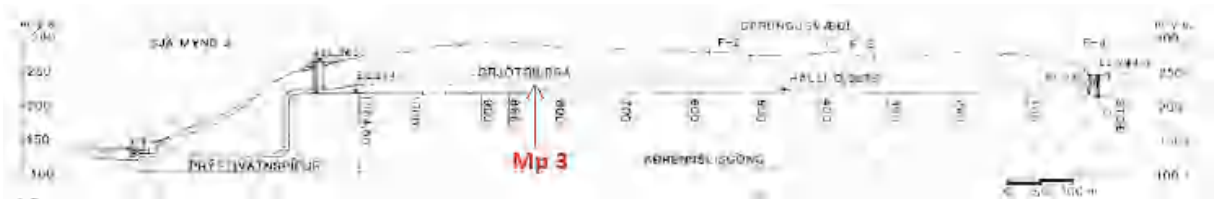
5.1.1. Búrfell

Bergspennumælingar voru gerðar í Búrfelli með yfirborunaraðferð árið 1966 (Hast, 1967). Voru þær gerðar í tengslum við byggingu Búrfellsvirkjunar. Framkvæmdir við jarðgöng Búrfellsvirkjunar voru þegar hafnar sem gerðu notkun yfirborunaraðferðarinnar mögulega. Boraðar voru þrjár holur, ein lóðrétt (Mp 3) og tvær láréttar (Mp 2 og Mp 4), inni í aðrennslisgöngunum. Aðrennslisgöngin eru 10 m að þvermáli og eru að jafnaði á um 50 - 75 m dýpi (Páll Ólafsson, 1984). Langsnið jarðganga Búrfellsvirkjunar er sýnt á mynd 5.2. Lóðrétta holan, Mp 3, var boruð í þak ganganna og var ætluð til að ákvarða stærð og stefnu láréttra spenna.

Tafla 5.2: Dýpi og tegund yfirborunarmælinga í Búrfellsvirkjun.

Tegund yfirborunar	Borhola	Stefna borholu	Fjöldi mælinga	Dýpi mælinga [m]*
Lárétt 2D	Mp 2	N41°A	2	13,0 - 17,0
Lóðrétt 3D	Mp 3		4	2,5 - 12,0
Lárétt 2D	Mp 4	N59°V	1	17,0

*Fjarlægð frá yfirborði gangaþversniðs.



Mynd 5.2: Langsnið jarðganga í Búrfellsvirkjun. Staðsetning á borholu Mp 3 er sýnd en ekki er vitað nákvæmlega hvar holur Mp 2 og Mp 4 eru (Páll Ólafsson, 1984).

Mp 3:

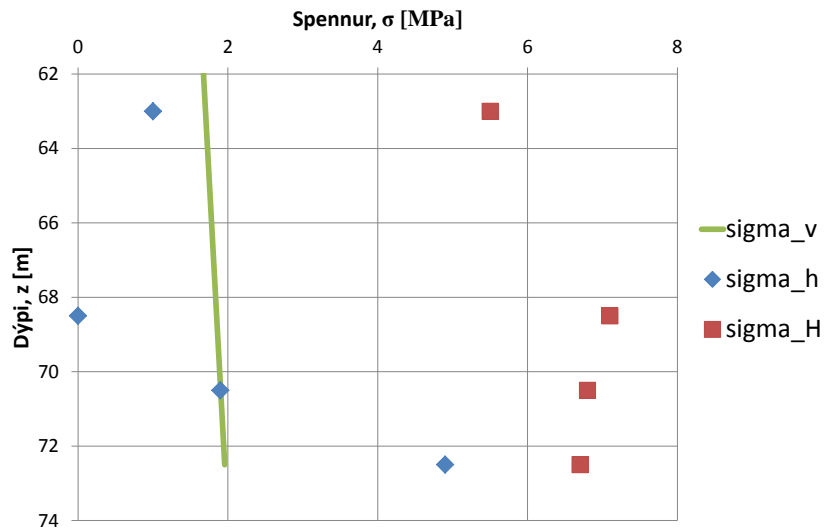
Lóðrétta borholan Mp 3 var boruð upp á við í stöð 830 en þar er dýpi ganganna mest eða um 75 m.

Tafla 5.3: Niðurstöður 3D yfirborunar í holu Mp3 í aðrennslisgöngum Búrfellsvirkjunar.

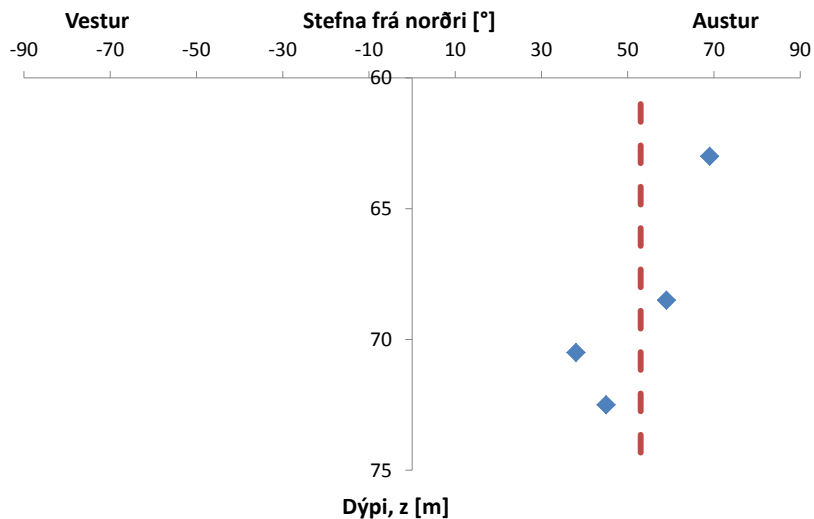
Fjarl. frá yfirborði ganga [m]	Dýpi frá yfirborði jarðar [m]	σ_h [MPa]	σ_H [MPa]	σ_v [MPa]	k -stuðull [-]	Stefna σ_H
12,0	63	1,0	5,5	1,70	1,63	N69°A
6,5	68,5	~ 0	7,1	1,85	1,78	N59°A
4,5	70,5	1,9	6,8	1,9	2,18	N38°A
2,5	72,5	4,9	6,7	1,96	2,9	N45°A

5. Bergspennur á Íslandi

Hafa verður þann fyrirvara á niðurstöðunum sem sýndar eru í töflu 5.3 að mælingarnar eru allar gerðar mjög nálægt yfirborði gangaþversniðsins og eru því að öllum líkindum undir áhrifum af breyttu spennuástandi vegna myndunar ganganna. Helst væri það mælingin sem gerð er 12 m inni í holunni sem er ekki undir áhrifum breytts spennuástands við göngin. Niðurstöður mælinganna eru sýndar myndrænt á myndum 5.3 og 5.4.



Mynd 5.3: Niðurstöður 3D yfirborunar í holu Mp 3 í aðrennslisgöngum Búrfellsvirkjunar.



Mynd 5.4: Stefna hæstu láréttu spennu í holu Mp 3 í aðrennslisgöngum Búrfellsvirkjunar. Brotalínan sýnir meðalstefnuna.

Stefna hæstu láréttu spennu, σ_H , er nokkuð stöðug í norðaustur átt eða $N53^\circ A \pm 14^\circ$ að meðaltali. Lægstu láréttu spennur, σ_h , eru hornréttar á þær hæstu og eru því að meðaltali í stefnu $N37^\circ V \pm 14^\circ$.

Meðaltal hæstu og lægstu láréttra spennna í holunni eru í öllum tilfellum hærri en lóðréttu spennurnar, þ.e. $k > 1$. Lárétta spennurnar eru því ráðandi á því dýpi sem þessar mælingar ná til.

Línulega nálgun á láréttum spennum í Búrfelli sem fall af dýpi og meðalstefnur þeirra má sjá í töflu 5.4.

Tafla 5.4: Línuleg nálgun á láréttum spennum ásamt meðalstefnu.

Nálgun	Fylgni	Meðalstefna	Gæði
$\sigma_H = 0,22z - 8,30$	0,64	$N53^\circ A \pm 14^\circ$	D
$\sigma_h = 0,79z - 52,5$	0,43	$N37^\circ V \pm 14^\circ$	

Mp 2 og Mp 4:

Báðar þessar holur eru láréttar. Ekki er gefið upp hvar í göngunum borholurnar eru staðsettar og þ.a.l. ekki hægt að segja með fullri vissu á hvaða dýpi þær eru. En eins og greint var frá hér á undan þá eru aðrennslisgöngin á 50 - 75 m dýpi og verður því gert ráð fyrir að borholur Mp 2 og Mp 4 séu á u.þ.b. 60 m dýpi.

Tafla 5.5: Niðurstöður 2D yfirborunar í aðrennslisgöngum Búrfellsvirkjunar.

Borhola	Lóðréttar spennur σ_v [MPa]*	Láréttar spennur σ_x [MPa]	k -stuðull [-]	Stefna σ_x
Mp 2	1,6	0,87	0,54	$N59^\circ V$
Mp 4	2,0*	2,3	1,15	$N31^\circ A$

*Mæld gildi.

Eins og gefið er upp í töflu 5.2 þá eru mælingarnar í holum Mp 2 og Mp 4 gerðar í 13 - 17 m fjarlægð frá yfirborði gangaþversniðsins. Það ætti að teljast hæfileg fjarlægð til að niðurstöður mælinganna verði ekki fyrir áhrifum af breyttu spennuástandi í berginu næst göngunum.

5.1.2. Reykjavík

Bergspennumælingar voru gerðar með vökvaþrýstiprófi í Reykjavík árið 1977 (Haimson & Voight, 1977). Megin tilgangur þeirra var að kanna áhrif flekahreyfinga á spennumyndun en Reykjavík er mjög nálægt flekaskilum Evrasíu- og Norður Ameríkuflekanna. Mælingarnar fóru fram í tveimur holum, H18 og H32, en þær höfðu verið boraðar 15-20 árum áður í tengslum við jarðhitarannsóknir. Hóla H18 var boruð árið 1956 á horni Reykjavegar og Sundlaugarveggar niður á 697 m dýpi. Í henni voru gerðar sjö mælingar og heppnuðust þrjár þeirra. Hóla H32 var boruð árið 1961 á horni Miklubrautar og Grensásveggar niður

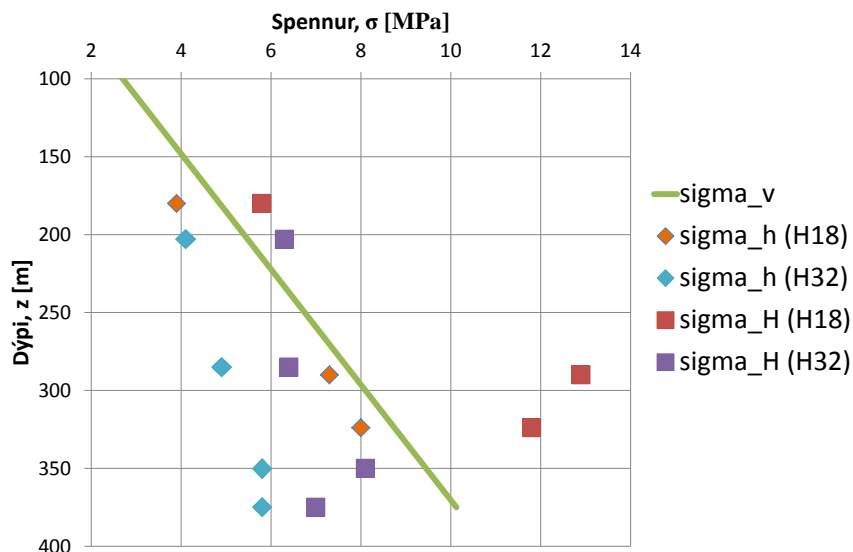
5. Bergspennur á Íslandi

á 606 m dýpi. Í henni voru gerðar fjórar mælingar og heppnuðust þær allar. Bergið í borholunum er fyrst og fremst 1,8 - 2,8 milljón ára gamalt gosberg. Tafla 5.6 og myndir 5.5 og 5.6 sýna niðurstöður vökvaprýstiprófs í borholum H18 og H32.

Tafla 5.6: Niðurstöður vökvaprýstiprófs í holum H18 og H32 í Reykjavík.

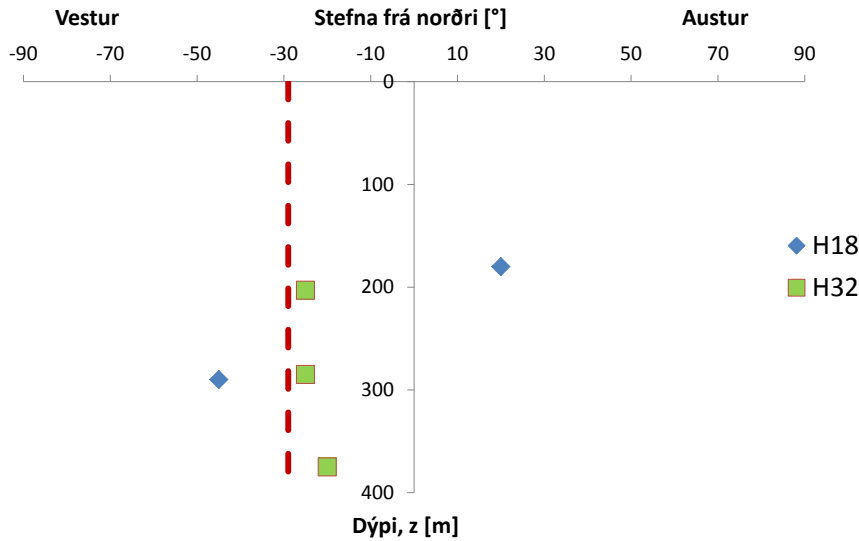
	Dýpi frá yfirborði [m]	σ_h [MPa]	σ_H [MPa]	σ_v [MPa]	k -stuðull [-]	Stefna σ_H
H18	180	3,9	5,8	4,9	1,00	(N20°A)*
	290	7,3	12,9	7,8	1,29	N45°V
	324	8,0	11,8	8,7	1,13	-
H32	203	4,1	6,3	5,5	0,95	N25°V
	285	4,9	6,4	7,7	0,73	N25°V
	350	5,8	8,1	9,5	0,74	-
	375	5,8	7,0	10,1	0,63	N20°V

*Mælingin ekki notuð við útreikning á meðalstefnu.



Mynd 5.5: Niðurstöður vökvaprýstiprófs í holum H18 og H32 í Reykjavík.

Stefna hæstu láréttu spennu, σ_H , var könnuð á tveimur stöðum í holu H18 en mælingarnar gefa talsvert ólíkar niðurstöður. Önnur sýnir stefnu í norðaustur á meðan hin sýnir stefnu í norðvestur. Athugun á stefnu σ_H í holu H32 gefur mun ákveðnari niðurstöðu þar sem allar athuganir gefa til kynna stefnu í norð-norðvestur. Að meðaltali er stefna σ_H N19°V \pm 24° en N29°V \pm 11° sé athuguninni af dýpi 180 m í holu H18 sleppt. Þessi stefna er hér um bil hornrétt á stefnu flekaskilanna. Mynd 5.6 sýnir stefnu hæstu láréttu spennu í holum H18 og H32. Við ákvörðun á meðalstefnunni var mælingunni á dýpi 180 m sleppt.



Mynd 5.6: Stefnur hæstu láréttu spennu á mismunandi dýpi í holum H18 og H32 í Reykjavík. Brotalínan sýnir meðalstefnuna, ath. að mælingin á dýpi 180 m er ekki tekin með.

Í holu H18 er k -stuðullinn að meðaltali 1,14 og gefur það til kynna að meðaltal láréttra spennu í holunni eru nokkuð hærri en þær lóðréttu. Í holu H32 er k -stuðullinn mun lægri eða 0,76 að meðaltali sem þýðir að láréttar spennur eru lægri en þær lóðréttu. Þar sem mæligildið á 180 m dýpi í holu H18 sker sig verulega frá öðrum mælingum var því gildi sleppt við túlkun gagna frá Reykjavíkursvæðinu. Eins og nefnt var í kafla 3 þá á sér stað gliðnun milli Evrasíu- og Norður Ameríkuflekanna. Þar sem bergið á Reykjavíkursvæðinu er ungt og flekarnir eru ekki að þrýsta hvor á annan þá er ekki óeðlilegt að láréttar spennur séu lágar og þá oft lægri en þær lóðréttu eins og í þessu tilfelli.

Línulega nálgun á láréttum spennum í holum H18 og H32 í Reykjavík sem fall af dýpi og meðalstefnur þeirra má sjá í töflu 5.7.

Tafla 5.7: Línuleg nálgun á láréttum spennum ásamt meðalstefnu í Reykjavík.

Nálgun	Fylgni, R^2	Meðalstefna	Gæði
$\sigma_h = 0,03z - 3,78$	0,42	$N61^\circ A \pm 11^\circ$ ¹	C
$\sigma_H = 0,11z - 22,5$	0,13	$N29^\circ V \pm 11^\circ$ ¹	

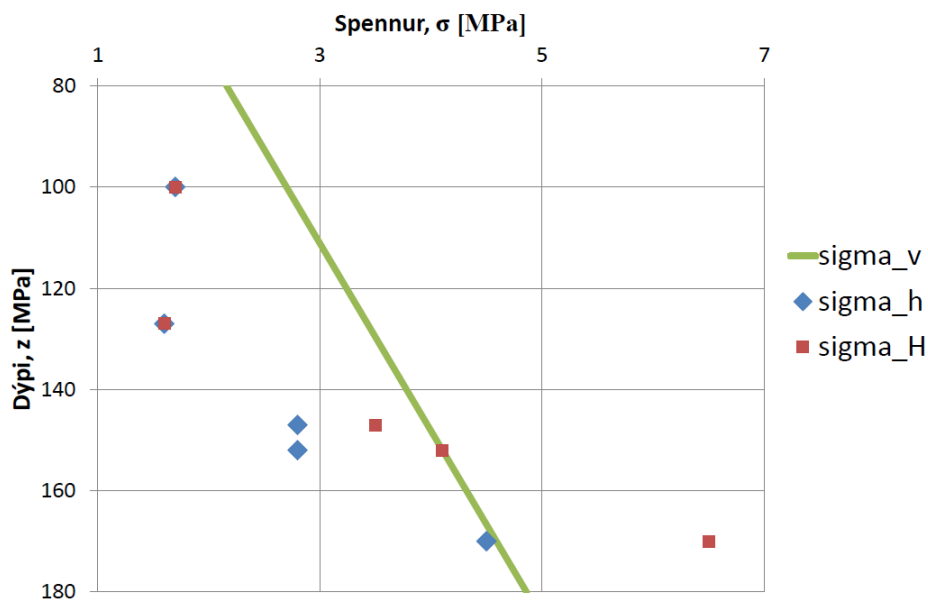
¹Stefna σ_H og σ_h á dýpi 180 m er ekki tekin með.

5.1.3. Blönduvirkjun

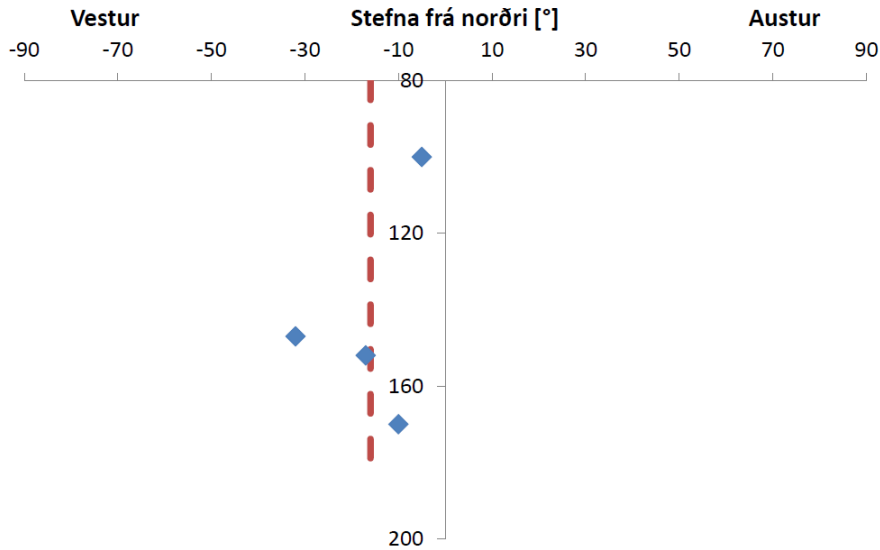
Bergspennumælingar með vökvaprýstiprófi voru gerðar við Blöndu árið 1979 vegna fyrirhugaðrar byggingar Blönduvirkjunar (Haimson & Ingimarsson, 2007). Boruð var ein hola (BV-12) og gerðar í henni fimm mælingar. Tafla 5.8 og myndir 5.7 og 5.8 sýna niðurstöður mælinganna.

Tafla 5.8: Niðurstöður vökvaprýstiprófs í Holu BV-12 við Blönduvirkjun.

Dýpi frá yfirborði [m]	σ_h [MPa]	σ_H [MPa]	σ_v [MPa]	k -stuðull [-]	Stefna σ_H
100	1,7	1,7	2,7	0,63	N5°V
127	1,6	1,6	3,4	0,47	-
147	2,8	3,5	4,0	0,79	N32°V
152	2,8	4,1	4,1	0,84	N17°V
170	4,5	6,5	4,6	1,20	N10°V



Mynd 5.7: Niðurstöður vökvaprýstiprófs í holu BV-12 við Blönduvirkjun.



Mynd 5.8: Stefnur hæstu láréttu spennu á mismunandi dýpi í holu BV-12 við Blönduvirkjun. Brotalínan sýnir meðalstefnuna.

Stefna hæstu láréttu spennu, σ_H , er nokkuð stöðug í norð-norðvestur átt og er hún að meðaltali $N16^\circ V \pm 12^\circ$. Á dýpi 100 m og 127 m eru láréttar spennur þær sömu úr öllum áttum, þ.e. $\sigma_h = \sigma_H$. Í öllum mælingum, nema á dýpi 170 m, eru láréttar spennur lægri en þær lóðréttu, þ.e. $k < 1$. Að meðaltali er $k = 0,79$ og eru lóðréttar spennur á svæðinu því ráðandi. Við hönnun á stöðvarhúshelli eins og í þessu tilfalli er leitast við að lengdarás hellisins snúi í sömu átt og σ_H , því að algengast er að það sé stærsta höfuðspennan, $\sigma_h < \sigma_v < \sigma_H$. Hér eru hins vegar lóðréttar spennur hæstar ef undanskildar eru mælingarnar á dýpi 170 m, $\sigma_h \leq \sigma_H < \sigma_v$. Aðrir þættir en stefna σ_H hafa því meiri áhrif á lögum stöðvarhússins.

Línulega nálgun á láréttum spennum við Blönduvirkjun sem fall af dýpi og meðalstefnur þeirra má sjá í töflu 5.9.

Tafla 5.9: Línuleg nálgun á láréttum spennum ásamt meðalstefnu við Blönduvirkjun.

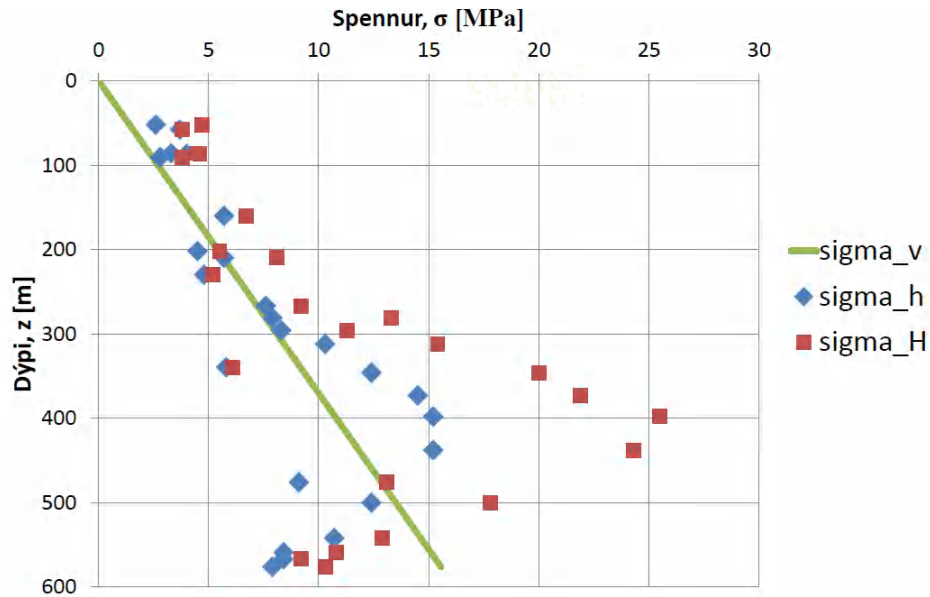
Nálgun	Fylgni	Meðalstefna	Gæði
$\sigma_h = 0,05z - 4,23$	0,78	$N74^\circ A \pm 12^\circ$	C
$\sigma_H = 0,08z - 8,16$	0,81	$N16^\circ V \pm 12^\circ$	

5.1.4. Reyðarfjörður

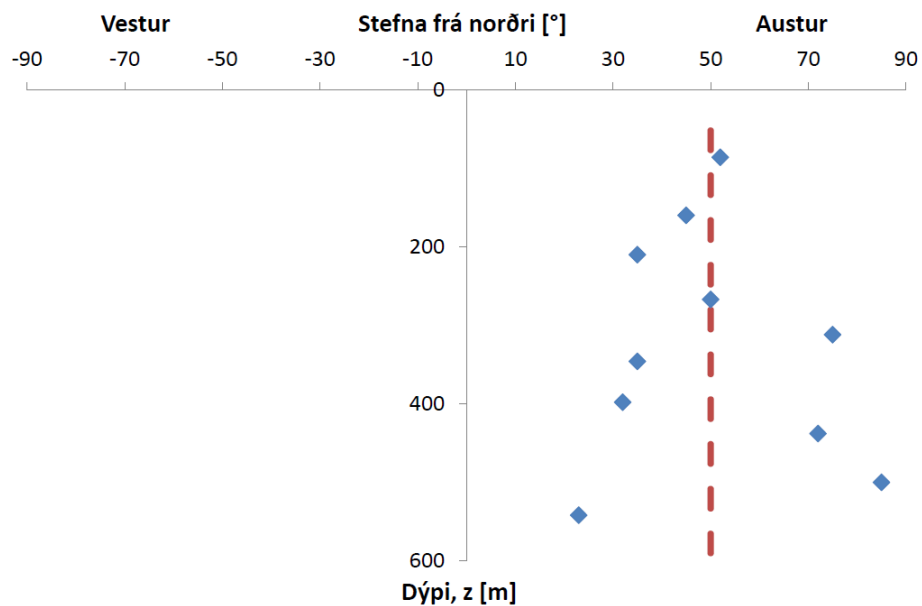
Boruð var borhola í Reyðarfirði og bergspennumælingar framkvæmdar þar með vökv-
aþrýstiprófi árið 1981 (Haimson & Rummel, 1981). Holan var boruð 6,5 km vestan við
byggðina í Reyðarfirði og er yfirborð hennar í svipaðri hæð og yfirborð sjávar. Jarðlög-
in á Reyðarfjarðarsvæðinu samanstanda aðallega af holóttu þóleiít-basalthrauni. Borað
var niður á 1919 m dýpi með þvermálið 7,6 cm fyrstu 1350 metrana og 6,0 cm á dýpinu
1350-1919 m. Gerðar voru 32 mælingar með á dýpinu 33-582 m og heppnuðust 24 þeirra.
Niðurstöður mælinganna má sjá í töflu 5.10 og á myndum 5.9 og 5.10.

Tafla 5.10: Niðurstöður vökvaprýstiprófs í Reyðarfirði.

Dýpi frá yfirborði [m]	σ_h [MPa]	σ_H [MPa]	σ_v [MPa]	k -stuðull [-]	Stefna σ_H
52	2,6	4,7	1,4	2,6	-
58	3,7	3,8	1,6	2,39	-
86	3,3	4,5	2,3	1,68	N52°A
87	4,0	4,6	2,3	1,83	-
90,5	2,8	3,8	2,4	1,38	-
160	5,7	6,7	4,3	1,44	N45°A
202	4,5	5,5	5,5	0,92	-
210	5,7	8,1	5,7	1,22	N35°A
230	4,8	5,2	6,2	0,81	-
267	7,6	9,2	7,2	1,17	N50°A
281	7,9	13,3	7,6	1,40	-
296	8,3	11,3	8,0	1,23	-
312	10,3	15,4	8,4	1,53	N75°A
339,5	5,8	6,1	9,2	0,65	-
346	12,4	20	9,3	1,73	N35°A
373	14,5	21,9	10,1	1,81	-
398	15,2	25,5	10,7	1,89	N32°A
438	15,2	24,3	11,8	1,67	N72°A
476	9,1	13,1	12,9	0,86	-
500	12,4	17,8	13,5	1,12	N85°A
542	10,7	12,9	14,6	0,81	N23°A
559	8,4	10,8	15,1	0,64	-
567	8,4	9,2	15,3	0,57	-
576	7,9	10,3	15,6	0,59	-



Mynd 5.9: Niðurstöður vökvaprýstiprófs í Reyðarfirði.



Mynd 5.10: Stefnur hæstu láréttu spennu á mismunandi dýpi í Reyðarfirði. Brotalínan sýnir meðalstefnuna.

Á mynd 5.9 sést að láréttar spennur fylgja nokkurn veginn þeim lóðréttu niður á 300 m dýpi en eftir það verður meiri dreifing. Stefna hæstu láréttu spennu, σ_H , er nokkuð breytileg en hún nær frá norð-norðvestur átt og alveg í austur eftir því á hvaða dýpi mælingarnar eru gerðar. Meðalstefna σ_H er $N50^\circ E \pm 21^\circ$. Mynd 5.10 sýnir að mesti

5. Bergspennur á Íslandi

munurinn á stefnu σ_H er á tveimur dýpstu stöðunum. k -stuðullinn er að meðaltali 1,33 á öllu dýptarbilinu og fer hann heldur lækkandi með auknu dýpi ef frá er talið dýptarbilið 300 - 500 m.

Línulega nálgun á láréttum spennum í Reyðarfirði sem fall af dýpi og meðalstefnur þeirra má sjá í töflu 5.11.

Tafla 5.11: Línuleg nálgun á láréttum spennum ásamt meðalstefnu í Reyðarfirði.

Nálgun	Fylgni, R^2	Meðalstefna	Gæði
$\sigma_h = 0,03z - 2,20$	0,48	$N40^\circ V \pm 21^\circ$	C
$\sigma_H = 0,08z - 8,16$	0,33	$N50^\circ A \pm 21^\circ$	

5.1.5. Sandafell

Bergspennumælingar voru gerðar í Sandafelli með vökvaþrýstiprófi árið 1981 (Haimson, 1981a). Var það í tengslum við fyrirhugaðar framkvæmdir við Sultartangavirkjun. Boruð var ein hola (SF-18) og gerðar í henni 6 mælingar á 74 - 149 m dýpi. Sandafell nær hæst í 450 m.y.s. um 14 km norðaustan við Búrfellsvirkjun. Bergið í holu SF-18 er að mestu leyti basalt, um milljón ára gamalt. Berggæðin í holunni þóttu góð og voru í því færri sprungur en gengur og gerist í basaltlögum annars staðar á Íslandi. Tafla 5.12 og myndir 5.11 og 5.12 sýna niðurstöður vökvaþrýstiprófs í Sandafelli.

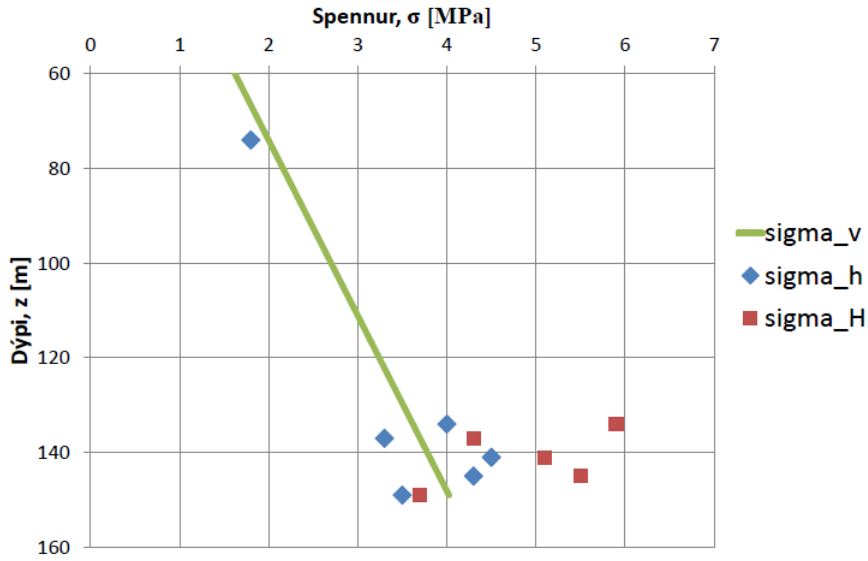
Tafla 5.12: Niðurstöður vökvaþrýstiprófs í Sandafelli.

Dýpi frá yfirborði [m]	σ_h [MPa]	σ_H [MPa]	σ_v [MPa]	k -stuðull [-]	Stefna σ_H
74	1,8	0,3 ¹	2,0	-	(N53°V) ²
134	4,0	5,9	3,6	1,37	N45°A
137	3,3	4,3	3,7	1,03	N43°A
141	4,5	5,1	3,8	1,26	-
145	4,3	5,5	3,9	1,25	N16°A
149	3,5	3,7	4,0	0,89	-

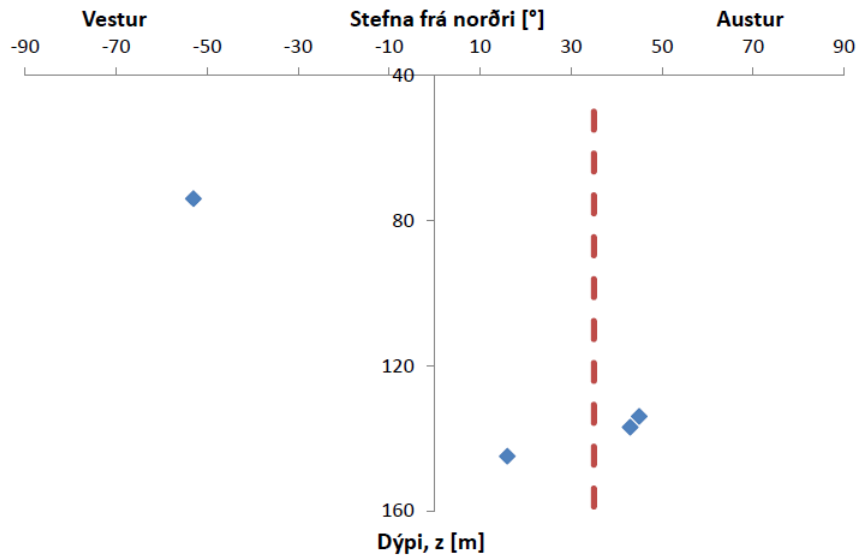
¹Útreikningur heppnaðist ekki.

²Mælingin ekki notuð við útreikning á meðalstefnu.

Útreikningur á hæstu láréttu spennu, σ_H , á dýpi 74 m gaf mjög ótrúverðugt gildi þar sem það er lægra en lægsta lárétta spenna, σ_h . Það er talið merki þess að á þessu dýpi er í raun $\sigma_h \approx \sigma_H$, og má gera ráð fyrir að svo sé í þessu tilfalli þó ekki sé hægt að segja til um það með fullri vissu. Einnig er stefna σ_H á dýpi 74 m talsvert á skjön við þær stefnur sem mælast þegar komið er á meira dýpi, það gildi er því ekki notað við útreikning á meðalstefnu.



Mynd 5.11: Niðurstöður vökvaprýstiprófs í Sandafelli.



Mynd 5.12: Stefnur hæstu láréttu spennu á mismunandi dýpi í Sandafelli. Brotalínan sýnir meðalstefnuna, ath. að mælingin á dýpi 74 m er ekki tekin með.

Að undanskilinni mælingunni á dýpi 74 m þá er stefna hæstu láréttu spennu, σ_H , nokkuð stöðug í norðaustur átt eða $N35^\circ A \pm 16^\circ$ að meðaltali. Lægstu láréttu spennur, σ_h , eru hornréttar á þær hæstu og eru því að meðaltali í stefnu $N55^\circ V \pm 16^\circ$. Meðaltal hæstu og lægstu lárétttra spenna í holunni eru í öllum tilfellum nema einu hærri en lóðréttu spennurnar, þ.e. $k > 1$. Hér er lárétti spennuþátturinn því sá sem þarf að gefa mestan gaum ef gera á ný neðanjarðarmannvirki á þessum stað.

5. Bergspennur á Íslandi

Línulega nálgun á láréttum spennum við Sandafell sem fall af dýpi og meðalstefnur þeirra má sjá í töflu 5.13. Ath. að nálgunin á σ_H er ómarktæk þar sem hún gerir ráð fyrir mikilli lækkun á σ_H með auknu dýpi.

Tafla 5.13: Línuleg nálgun á láréttum spennum ásamt meðalstefnu í Sandafelli.

Nálgun	Fylgni	Meðalstefna	Gæði
$\sigma_h = 0,04z - 1,68$	0,75	$N55^\circ V \pm 16^\circ$	C
$\sigma_H = -0,27z + 43,16^*$	0,30	$N35^\circ A \pm 16^\circ$	

*Ómarktæk nálgun.

5.1.6. Teigsbjarg

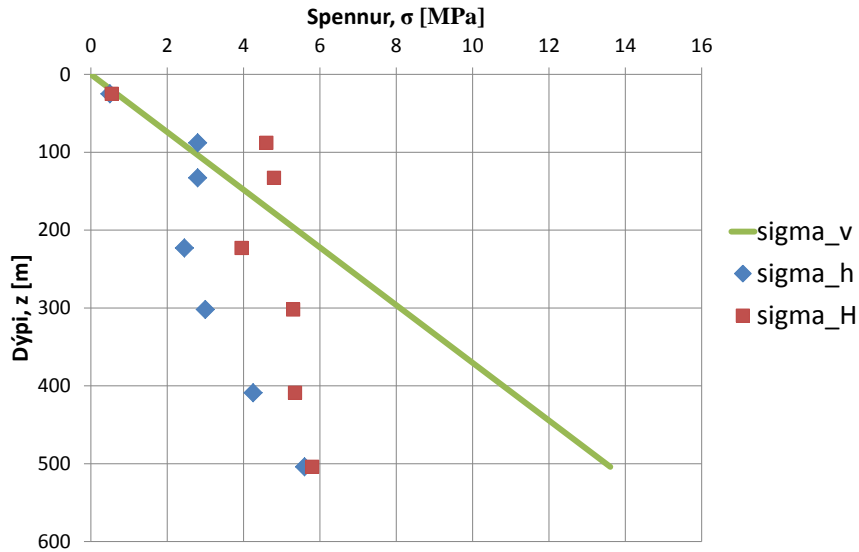
Bergspennumælingar hafa þrisvar sinnum verið gerðar í Teigsbjargi, fyrst árið 1981 (Haimson, 1981b), næst árið 1998 (Klee & Rummel, 1998b) og seinast árið 2005 (Dahle, 2005b). Teigsbjarg er staðsett í Fljótsdal á austanverðu Íslandi 12 km suðvestur af Lagarfljóti þar sem Fljótsdalsstöð, stöðvarhús Kárahnjúkavirkjunar, er nú. Hæsti punktur þess stendur í 625 m.y.s. Jarðlöggin á þessu svæði einkennast aðallega af 3-5 milljón ára gömlu basalti en einnig má finna móbergssetlög á stöku stað (Haimson, 1981b).

Teigsbjarg 1981, hola FV-1

Mælingarnar árið 1981 voru gerðar með vökvaþrýstiprófi, vegna fyrirhugaðrar byggingar stöðvarhúss í fjallinu. Boruð var ein hola (FV-1) um 640 m lóðrétt niður í jörðina og átta mælingar gerðar á mismunandi dýpi í holunni. Sjö prófanna heppnuðust. Niðurstöður þeirra má sjá í töflu 5.14 og á myndum 5.13 og 5.14.

Tafla 5.14: Niðurstöður vökvaþrýstiprófs í Teigsbjargi, holu FV-1.

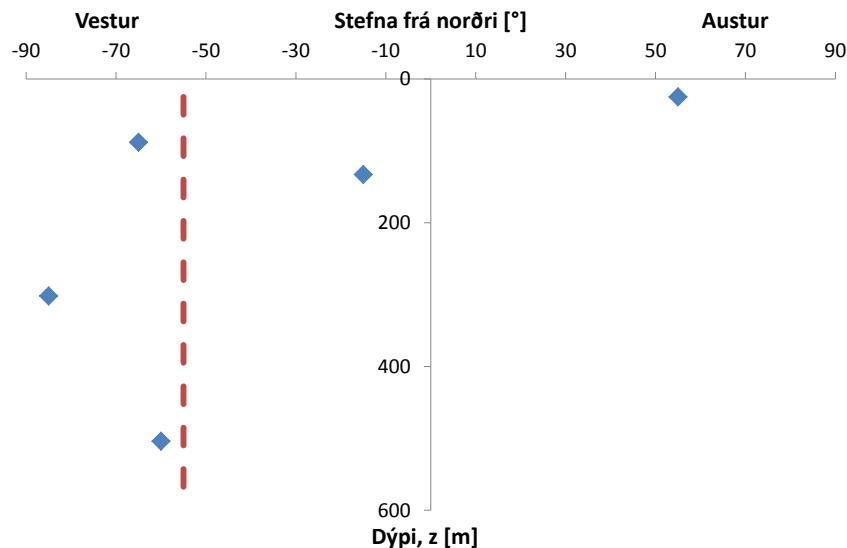
Dýpi frá yfirborði [m]	σ_h [MPa]	σ_H [MPa]	σ_v [MPa]	k -stuðull [-]	Stefna σ_H
25	0,5	0,6	0,7	0,78	N55°A
88	2,8	4,6	2,4	1,56	N65°V
133	2,8	4,8	3,6	1,06	N15°V
223	2,5	4,0	6,0	0,53	-
302	3,0	5,3	8,2	0,51	N85°V
409	4,3	5,4	11,0	0,43	-
504	5,6	5,8	13,6	0,42	N60°V



Mynd 5.13: Niðurstöður vökvaprýstiprófs í Teigsbjargi, holu FV-1.

Eins og sést berlega á mynd 5.13 þá eru bæði hæstu og lægstu láréttu spennur mun lægri en þær lóðréttu eftir að komið er á 200 m dýpi. Meðaltal k -stuðulsins er hér $k = 0,76$ og á 500 m dýpi er hann einungis $k = 0,42$, þar sem $\sigma_h \leq \sigma_H < \sigma_v$.

Stefna hæstu láréttu spennu, σ_H , er nokkuð stöðug í norðvestur átt ef frá er talin fyrsta mælingin á 25 m dýpi. Meðalstefna hæstu láréttu spennu á dýpinu 88 - 504 m er $N55^\circ V \pm 30^\circ$. Meðalstefna lægstu láréttu spennu á sama dýptarbili er hornrétt á hæstu spennurnar eða $N35^\circ A \pm 30^\circ$.



Mynd 5.14: Stefnur hæstu láréttu spennu á mismunandi dýpi í Teigsbjargi, holu FV-1. Brotalínan sýnir meðalstefnuna, ath. að mælingin á dýpi 25 m er ekki tekin með.

5. Bergspennur á Íslandi

Þessar mælingar árið 1981 voru gerðar vegna fyrirhugaðrar byggingar stöðvarhúss í fjallinu á um 500 m dýpi. Eins og sagt var í kafla 2.1 þá er mælt með því að lengdarás stöðvarhúshellis sé í sömu stefnu og stefna hæstu láréttu spennu, vegna þess að það er venjulega stærsta höfuðspennan. Hér eru hins vegar lóðréttu spennurnar stærstar og þarf stefna stöðvarhússins því ekki að ráðast af stefnu σ_H .

Línuleg nálgun á láréttum spennum í Teigsbjargi, holu FV 1, sem fall af dýpi og meðalstefnur þeirra má sjá í töflu 5.15.

Tafla 5.15: Línuleg nálgun á láréttum spennum ásamt meðalstefnu í holu FV-1.

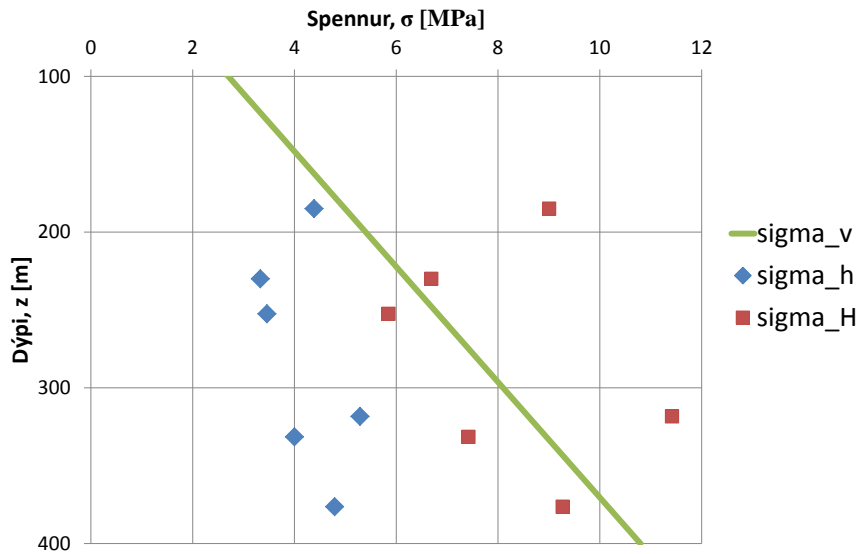
Nálgun	Fylgni	Meðalstefna	Gæði
$\sigma_h = 0,01z + 0,66$	0,81	$N34^\circ A \pm 30^\circ$	D
$\sigma_H = 0,01z + 0,97$	0,53	$N56^\circ V \pm 30^\circ$	

Teigsbjarg 1998, hola FV-40

Mælingarnar í Teigsbjargi árið 1998 voru framkvæmdar af *Amberg Measuring Technique* í Sviss (Klee & Rummel, 1998a) og voru þær gerðar með vökvaprýstiprófi, einnig vegna fyrirhugaðrar byggingar stöðvarhúss í fjallinu. Boruð var ein hola (FV-40) um 460 m lóðrétt niður í jörðina. Borhola FV-1 sem boruð var árið 1981 er um 360 m suðaustur af holu FV-40. Gerðar voru 13 mælingar í holunni á dýptarbilinu 155,5 m - 412 m. Mikið var af sprungum í holunni og heppnuðust því einungis 6 mælinganna þannig að hægt væri að reikna út hæstu og lægstu láréttu spennur. Tafla 5.16 og myndir 5.15 og 5.16 sýna niðurstöður þeirra mælinga sem heppnuðust.

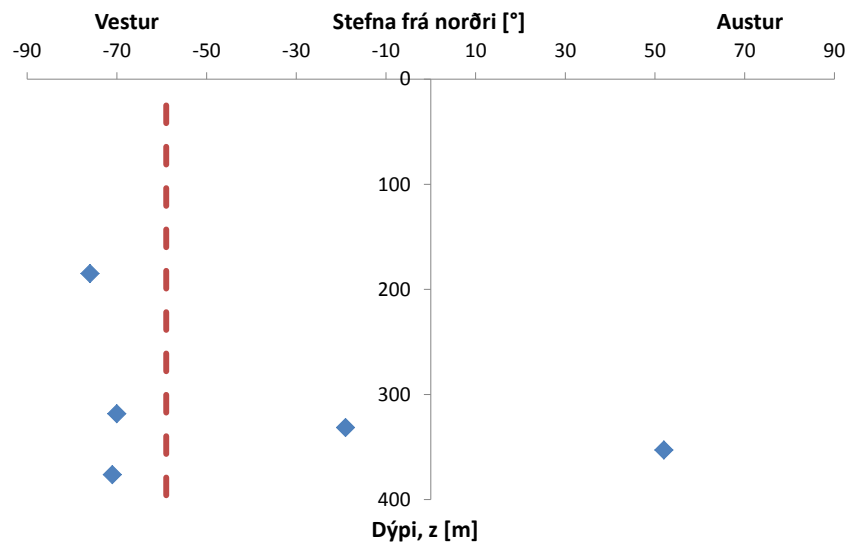
Tafla 5.16: Niðurstöður vökvaprýstiprófs í Teigsbjargi, holu FV-40.

Dýpi frá yfirborði [m]	σ_h [MPa]	σ_H [MPa]	σ_v [MPa]	k -stuðull [-]	Stefna σ_H
185	4,4	9,0	5,0	1,34	$N76^\circ V$
230	3,3	6,7	6,2	0,81	-
252,5	3,5	5,9	6,8	0,68	-
318,3	5,3	11,4	8,6	0,97	$N70^\circ V$
331,5	4,0	7,4	9,0	0,64	$N19^\circ V$
352,8	-	-	-	-	$N52^\circ A$
376,3	4,8	9,3	10,2	0,70	$N71^\circ V$



Mynd 5.15: Niðurstöður vökvabrýstiprófs í Teigsbjargi, holu FV-40.

Stefna hæstu láréttu spennu, σ_H , er nokkuð stöðug í norðvestur átt ef frá er talin mælingin á dýpi 352,8 m. Sé hún undanskilin þá er stefna σ_H að meðaltali $N59^\circ V \pm 27^\circ$. Lægstu láréttu spennur, σ_h , eru hornréttar á þær hæstu og eru því að meðaltali í stefnu $N31^\circ A \pm 27^\circ$.



Mynd 5.16: Stefnur hæstu láréttu spennu á mismunandi dýpi í Teigsbjargi, holu FV-40. Brotalínan sýnir meðalstefnuna, ath. að mælingin á dýpi 352,8 m er ekki tekin með (Klee & Rummel, 1998a).

5. Bergspennur á Íslandi

Mælingarnar í holu FV-40 voru gerðar í einungis 350 m fjarlægð frá holu FV-1 og það þarf því ekki að koma mikið á óvart að niðurstöðurnar eru nokkuð áþekkar. Meðaltal hæstu og lægstu láréttra spennna í holu FV-40 eru í öllum tilfellum nema einu lægri en lóðréttu spennurnar, þ.e. $k < 1$. Séu myndir 5.13 og 5.15 bornar saman sést að meiri munur er á hæstu og lægstu láréttu spennunum í holu FV-40. Vera má að yfirborðslandslagið hafi minni áhrif á spennur í holu FV-40 þar sem halli yfirborðsins þar sem sú hola er boruð er ekki jafnmikill og yfirborðið við holu FV-1.

Línulega nálgun á láréttum spennum í Teigsbjargi, holu FV-40, sem fall af dýpi og meðalstefnur þeirra má sjá í töflu 5.17.

Tafla 5.17: Línuleg nálgun á láréttum spennum ásamt meðalstefnu í holu FV40.

Nálgun	Fylgni	Meðalstefna	Gæði
$\sigma_h = 0,02z - 1,91$	0,24	$N31^\circ A \pm 27^\circ$	D
$\sigma_H = 0,08z + 15,02$	0,12	$N59^\circ V \pm 27^\circ$	

Fljótsdalsstöð/Teigsbjarg 2005

Mælingarnar árið 2005 voru gerðar með yfirborunaraðferð inni í fjallinu. Framkvæmdir við Fljótsdalsstöð voru þá hafnar sem gerðu mælingar með yfirborunaraðferðinni mögulegar. Boraðar voru 3 láréttar holur og gerðar 2D mælingar í þeim öllum. 3D mælingar voru einnig gerðar í borholu nr. 1 (Dahle, 2005b).

Tafla 5.18: Dýpi og tegund yfirborunarmælinga í Fljótsdalsstöð.

Tegund yfirborunar	Borhola nr.	Fjöldi mælinga ¹	Staðsetning mælinga [m] ²	Dýpi borholu [m] ³
2D	1	3/4	12,2 - 13,8	500
	2	4/6	0,6 - 5,1	500
	3	6/9	1,9 - 8,5	500
3D	1	7/8	14,2 - 18,5	500

¹ Fjöldi heppnaðra mælinga / Heildarfjöldi mælinga.

² Lárétt fjarlægð frá yfirborði gangaþversniðs.

³ Fjarlægð frá yfirborði jarðar.

Borhola nr. 1 er staðsett í aðkomugöngum stöðvarhússins, hola nr. 2 er í bergstöð (*e. pillar*) milli vélstæða og hola nr. 3 er í stöðvarhúsveggnum hægra megin við frárennslisgöng nr. 4, sjá mynd 5.17. Allar holurnar eru á u.þ.b. 500 m dýpi frá yfirborði fjallsins.



Mynd 5.17: Staðsetningar á yfirborunarmælingum í Fljótsdalsstöð (Dahle, 2005b).

3D mælingar:

Í borholu nr. 1 voru gerðar 8 mælingar og heppnuðust 7 þeirra. Niðurstöðurnar má sjá í töflu 5.19.

Tafla 5.19: Niðurstöður 3D yfirborunar í Fljótsdalsstöð, borholu nr.1. Fræðilegu gildin í töflunni eru reiknuð gildi skv. jöfnum (2.5), (2.2) og (2.4).

		Mæld gildi [MPa]	Fræðileg gildi [MPa]	Stefna	Halli frá láréttu
Höfuðspennur	σ_1	$10,0 \pm 6,0$		$N25^\circ V$	67°
	σ_2	$1,7 \pm 2,9$		$N14^\circ V$	23°
	σ_3	$-2,6 \pm 3,0^*$		$N74^\circ A$	4°
	σ_v	8,7	13,5		
	σ_H	2,9	2,6	$N18^\circ V$	
	σ_h	$-2,5^*$		$N72^\circ A$	
	$k [-]$	0,31	0,19		

*Neikvætt gildi táknar togspennu.

Hér voru lóðréttar spennur mældar sérstaklega og eru þær nokkuð lægri en fræðileg nálgun gerir ráð fyrir, þ.e. þegar miðað er við $\gamma = 0,027 MN/m^3$. Tölugildin á hæstu og lægstu láréttu spennum eru álíka há en neikvæða formerkið á σ_h þýðir að um togspennur er að ræða. k -stuðullinn er lágur eða 0,31 sem er þó herra en fræðilegt gildi fyrir sama dýpi.

5. Bergspennur á Íslandi

2D mælingar:

Mælingar með 2D yfirborun gefa upplýsingar um stærð lóðréttra spenna og einnig stærð láréttra spenna í stefnuna þvert á borholuna. Tafla 5.20 sýnir niðurstöður 2D yfirborunar í Fljótsdalsstöð.

Tafla 5.20: Niðurstöður 2D yfirborunar í Fljótsdalsstöð.

Borhola nr.	Lóðréttar spennur σ_v [MPa]	Láréttar spennur σ_X [MPa]	k -stuðull [-]	Stefna σ_X
1	10,5	-3,3	0,31	$N52^\circ A$
2	13,7	~ 0	-	$N45^\circ V^*$
3	9,7	-1,8	0,19	$N45^\circ V$

*Hér er engin lárétt spenna svo hún hefur í raun enga stefnu.

Engin lárétt spenna mældist í borholu nr. 2 og er stefna hennar því engin. Hefði lárétt spenna mælt í holunni þá væri stefna hennar hornrétt á stefnu borholunnar, þ.e. $N45^\circ V$. Láréttar spennur eru ekki háar miðað við lóðréttar og sést það í lágum k -stuðli. Mælingarnar voru ekki gerðar langt inni í veggjunum og má því ætla að láréttar spennur sem mældar eru hér séu undir áhrifum af breyttri spennudreifingu umhverfis göngin sem búið var að grafa út og var forsenda þess að hægt var að gera mælingar með yfirborunaraðferð. Þegar bornar eru saman stefnur láréttra spenna (σ_X) úr 2D yfirborun í töflu 5.20 og σ_H úr 3D yfirborun í töflu 5.19, sést að þær eru talsvert ólíkar. Það skýrist af því að í 2D yfirborun er ekki unnt að finna stefnu hæstu lárétta spennu heldur er stefnan fyrirfram skilgreind sem hornrétt á stefnu þeirrar borholu sem mælt er í. Sú stefna er ekki endilega sú sama og stefna σ_H .

5.1.7. Kárahnjúkar

Bergspennumælingar voru gerðar með vökvaþrýstiprófi við stíflustæði Kárahnjúkavirkjunar árið 1998 (Klee & Rummel, 1998b). Boraðar voru tvær lóðréttar holur, JB-6 og JB-16, og ein hallandi, JB-17. Nánari upplýsingar um borholurnar eru sýndar í töflum 5.21 og 5.22. Niðurstöður mælinganna eru sýndar í töflu 5.23 og á myndum 5.18 og 5.19.

Tafla 5.21: Helstu upplýsingar um borholur fyrir vökvaþrýstipróf við Kárahnjúka.

Nr. holu	Dýpi holu [m]	Dýpi mælinga [m]	Fj. mælinga ¹
JB-6 (lóðrétt)	180,8	65,2 - 133,6	4/5
JB-16 (lóðrétt)	176,6	141 - 155,8	2/7
JB-17 (hallandi)	171,2	33,9 - 44,6	2/2

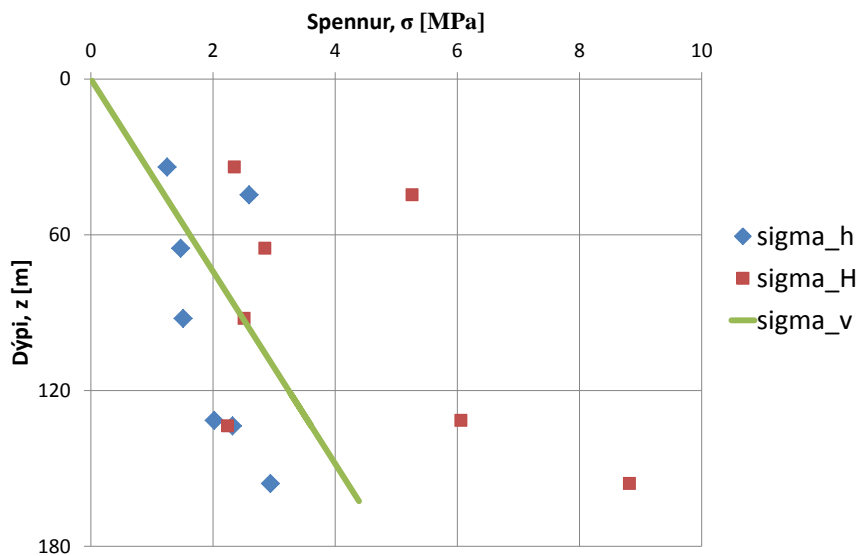
¹Fjöldi heppnaðra mælinga / Heildarfjöldi mælinga.

Tafla 5.22: Fjarlægðir milli borhola.

	JB-6	JB-16	JB-17
JB-6	-	500 m	230 m
JB-16	500 m	-	290 m
JB-17	230 m	290 m	-

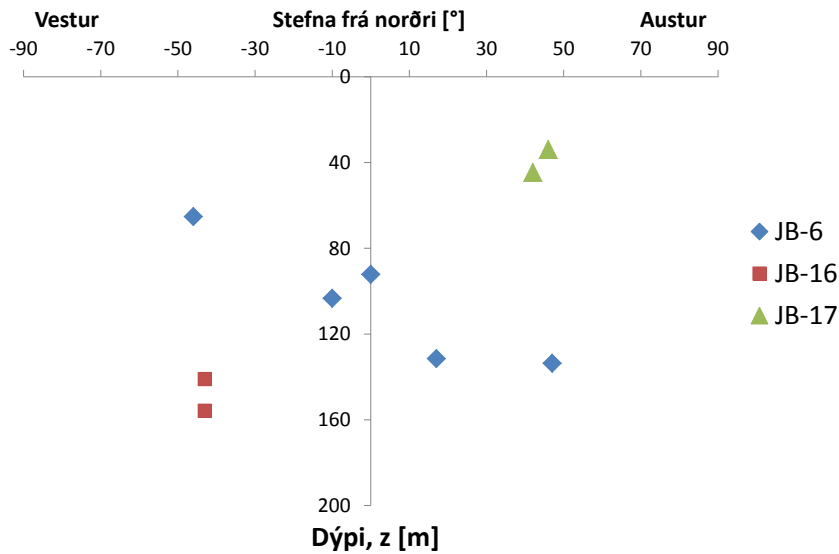
Tafla 5.23: Niðurstöður vökvaprýstiprófs í holum JB-6, JB-16 og JB-17 við Kárahnjúka.

	Dýpi frá yfirborði [m]	σ_h [MPa]	σ_H [MPa]	σ_v [MPa]	k -stuðull [-]	Stefna σ_H
JB-17	33,9	1,3	2,4	0,9	1,97	N46°A
	44,6	2,6	5,3	1,2	3,26	N42°A
JB-6	65,2	1,5	2,9	1,8	1,23	N46°V
	92,2	1,5	2,5	2,5	0,81	N
	103,3	-	-	-	-	N10°V
	131,5	2,0	6,1	3,6	1,14	N17°A
	133,6	2,3	2,2	3,6	0,63	N47°A
JB-16	141,0	-	-	-	-	N43°V
	155,8	2,9	8,8	4,2	1,40	N43°V



Mynd 5.18: Niðurstöður vökvaprýstiprófs í holum JB-6, JB-16 og JB-17 við Kárahnjúka.

5. Bergspennur á Íslandi



Mynd 5.19: Stefnur hæstu láréttnu spennu á mismunandi dýpi við Kárahnjúka, í borholum JB-6, JB-16 og JB-17. Fjarlægðir milli holanna eru sýndar í töflu 5.22.

Það er eftirtektarvert þegar lítið er á mynd 5.19 að stefna σ_H er mjög mismunandi eftir borholum og dýpi. Stefna σ_H er mest á reiki í holu JB-6 þar sem munurinn er nánast hornréttur á dýpi 65,2 m og 133,6 m eða 93° . Meðalstefna σ_H í holu JB-6 er $N2^\circ A$ en vegna þess hve munurinn milli ólíkustu stefnanna er mikill þá segir það í raun lítið. Stefnur σ_H í holum JB-16 og JB-17 eru mun afdráttarlausari sé horft á þær hvora í sínu lagi. Séu holurnar tvær hins vegar bornar saman sést að stefnur σ_h eru gjörólíkar eða $N43^\circ V$ í holu JB-16 og $N44^\circ A$ í holu JB-17 þrátt fyrir að fjarlægðin á milli þeirra er einungis 290 m. Af þeim sökum er erfitt að segja til um hver meðalstefna σ_H er þar sem skekkjumörkin verða mjög há.

Meðaltal hæstu og lægstu láréttna spenna er ólíkt eftir borholum. Það er áberandi hæst í holu JB-17 eða $k = 2,62$. Í holu JB-6 er $k = 0,95$ og $k = 1,40$ í holu JB-16 en það byggist þó einungis á einni mælingu.

Línuleg nálgun á láréttum spennum á Kárahnjúkum, holum JB-6, JB-16 og JB-17, sem fall af dýpi og meðalstefnu þeirra má sjá í töflu 5.24. Vakin er athygli á að skekkjumörk meðalstefnunnar eru mjög mikil og hafa verður það í huga við túlkun gagnanna.

Tafla 5.24: Línuleg nálgun á láréttum spennum í holum JB-6, JB-16 og JB-17 ásamt meðalstefnu við Kárahnjúka.

Nálgun	Fylgni	Meðalstefna	Gæði
$\sigma_h = 0,02z - 0,17$	0,32	$N89^\circ V \pm 39^\circ$	D
$\sigma_H = 0,1z - 5,07$	0,28	$N1^\circ A \pm 39^\circ$	

5.1.8. Fáskrúðsfjarðargöng

Bergspennumælingar voru gerðar í Fáskrúðsfjarðargöngum með yfirborunaraðferð árið 2004 (Dahle, 2005a). Göngin eru þau dýpstu á landinu en þau eru á um 1000 m dýpi þar sem þau eru dýpst. Jarðlögin samanstanda að stærstum hluta af 10 milljón ára gömlu basalti auk setlaga og móbergs. Á framkvæmdatíma ganganna hafði margt bent til þess að spennur í berginu væru miklar þar sem m.a. hafði brotnað úr veggjunum (*e. spalling*) í stífu jarðlögunum og miklar færslur í þeim veikari. Boraðar voru fimm holur, fjórar láréttar og ein lóðrétt. 2D mælingar voru gerðar í þeim öllum og 3D mælingar í þremur láréttu holanna, sjá töflu 5.25 og mynd 5.20.

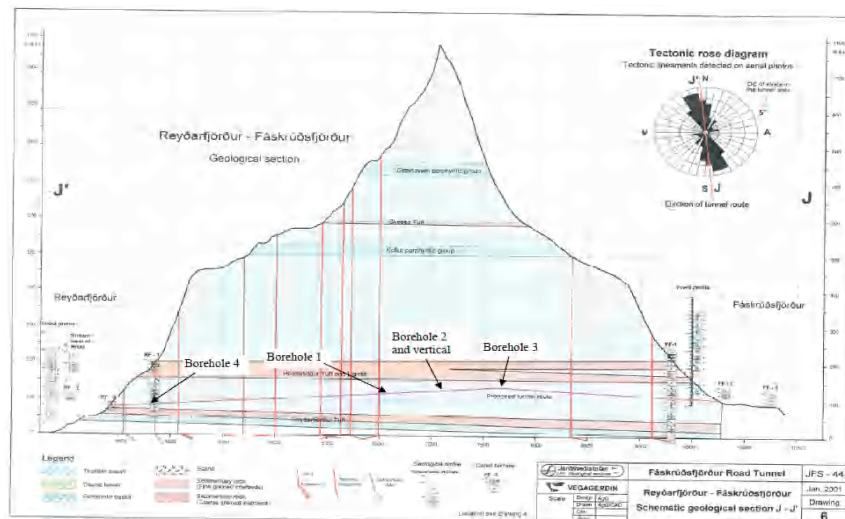
Tafla 5.25: Dýpi og tegund yfirborunarmælinga í Fáskrúðsfjarðargöngum.

Tegund yfirborunar	Borhola nr.	Fjöldi mælinga ¹	Staðsetning mælinga [m] ²	Dýpi mælinga [m] ³
2D	1	7/7	0,8 - 4,8	670
	2	5/6	1,0 - 3,5	955
	Lóðrétt	4/4	0,6 - 2,6	955
	3	8/9	0,7 - 8,0	510
	4	8/8	1,4 - 9,2	100
3D	1	8/8	11,0 - 15,0	670
	2	0/0	-	955
	3	7/9	11,0 - 17,3	510

¹Fjöldi heppnaðra mælinga / Heildarfjöldi mælinga.

²Fjarlægð frá yfirborði gangaþversniðs.

³Fjarlægð frá yfirborði jarðar.



Mynd 5.20: Langsnið af Fáskrúðsfjarðargöngum. Staðsetning borhola er merkt inn á myndina (Dahle, 2005a).

5. Bergspennur á Íslandi

3D mælingar:

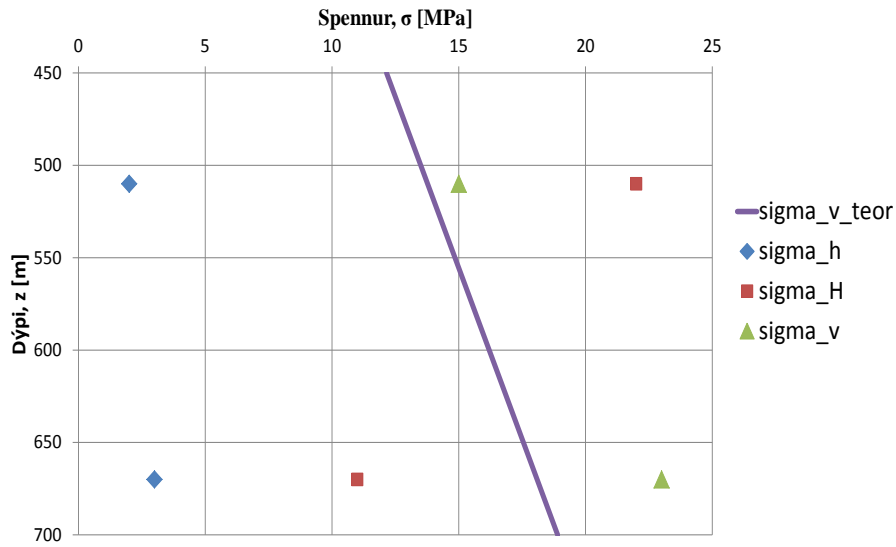
Niðurstöður spennumælinga með 3D yfirborunaraðferð má sjá í töflum 5.26 og 5.27 og á myndum 5.21 og 5.22. Fræðilegu gildin í töflunum eru reiknuð gildi skv. jöfnum (2.5), (2.2) og (2.4).

Tafla 5.26: Niðurstöður 3D yfirborunar í Fáskrúðsfjarðargöngum, borholu nr. 1.

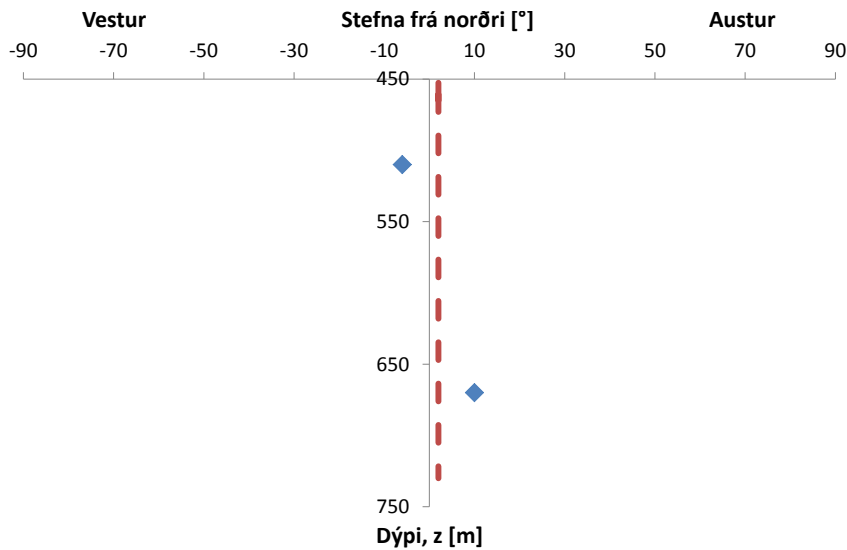
		Mæld gildi [MPa]	Fræðileg gildi [MPa]	Stefna σ_H	Halli frá láréttu
Höfuðspennur	σ_1	25,6 ± 6,1	-	N14°A	68°
	σ_2	8,4 ± 3,0	-	N10°V	21°
	σ_3	2,2 ± 4,9	-	N73°A	8°
	σ_v	23,0	19,0	-	-
	σ_H	11,0	4,0	N10°V	-
	σ_h	3,0	-	N89°A	-
	k [-]	0,30	0,21	-	-

Tafla 5.27: Niðurstöður 3D yfirborunar í Fáskrúðsfjarðargöngum, borholu nr. 3.

		Mæld gildi [MPa]	Fræðileg gildi [MPa]	Stefna σ_H	Halli frá láréttu
Höfuðspennur	σ_1	22,2 ± 4,9	-	N4°A	14°
	σ_2	14,9 ± 4,3	-	N41°A	73°
	σ_3	1,4 ± 5,5	-	N84°V	10°
	σ_v	15,0	27,0	-	-
	σ_H	22,0	5,0	N6°A	-
	σ_h	2,0	-	N84°V	-
	k [-]	0,80	0,19	-	-



Mynd 5.21: Niðurstöður 3D yfirborunar í holum nr. 1 og 3 í Fáskrúðsfjarðargöngum.



Mynd 5.22: Stefnur hæstu láréttu spennu í borholum nr. 1 og 3 í Fáskrúðsfjarðargöngum. Brotalínan sýnir meðalstefnuna.

3D mælingarnar í borholum nr. 1 og 3 gefa til kynna að stefna hæstu láréttu spennu er nánast beint í norður-suðurátt, eða $N2^\circ V$ að meðaltali. Fræðilegt gildi á σ_v má reikna skv. jöfnu (2.1) á bls. 6. Poisson's hlutfall bergsins var ákvarðað sem $\nu = 0,16$ og með því má reikna fræðilegt gildi á σ_H skv. jöfnu (2.2) á bls. 7. Þessi fræðilegu gildi má sjá í töflum 5.26 og 5.27. Bæði í borholu nr. 1 og 3 eru fræðileg gildi á σ_H mun lægri en mældu gildin. Gera má ráð fyrir að breytt spennudreifing umhverfis þversniðið vegna gangagerðarinnar hafi einhver áhrif á þetta en einnig eru berggangar nokkuð algengir á

5. Bergspennur á Íslandi

Þessu svæði og ekki ólíklegt að þeir hafi áhrif hér. Bæði borholur 1 og 3 eru langt inni í fjallinu svo ólíklegt er að landslag hafi áhrif á spennuástandið þar.

2D mælingar:

Tafla 5.28 sýnir niðurstöður 2D yfirborunar í láréttu borholunum.

Tafla 5.28: Niðurstöður 2D yfirborunar í láréttum holum í Fáskrúðsfjarðargöngum.

Borhola nr.	Lóðréttar spennur σ_v [MPa]	Láréttar spennur σ_x [MPa]
1	18,8 - 56,3	8,4
2	2,6 - 19,7	6,8
3	8,9 - 28,5	24,4
4	2,2 - 12,9	7,2

Ekki er gefin upp stefna borholanna, þ.e. hversu margar gráður frá norðri stefnan er. Hins vegar er vitað að láréttu borholurnar eru boraðar í vegg ganganna þvert á stefnu þeirra og stefna ganganna er u.þ.b. $N18^\circ V$. Það mun því einnig vera stefna láréttu spennanna. Niðurstöður 3D mælinganna gáfu einnig ótvírætt til kynna að stefna hæstu láréttu spennu væri í norður-suður átt og má því gera ráð fyrir að láréttu spennurnar í töflu 5.28 séu u.þ.b. þær hæstu, þ.e. $\sigma_x \approx \sigma_H$.

5.1.9. Aðrir staðir

Hér eru taldir upp aðrir staðir þar sem bergspennumælingar hafa farið fram en heimildir um þær ekki jafn ítarlegar. Voru niðurstöður þessara mælinga gefnar upp í viðaukum við skýrslur Haimson og Voight (1977) og Haimson og Rummel (1981) og þær notaðar til samanburðar við spennumælingar þeirra frá Reykjavík og Reyðarfirði.

Tafla 5.29: Niðurstöður bergspennumælinga frá nokkrum stöðum á Íslandi.

Staður	Tegund mælinga ¹	Dýpi frá yfirborði [m]	σ_h [MPa]	σ_H [MPa]	σ_v [MPa]	k -stuðull [-]	Stefna σ_H
Akurey	YB	3	~ 0	4,5	0,1	27,8	$N4^\circ V$
	YB	10	2,0	5,3	0,3	13,5	$N1^\circ V$
	YB	13	2,0	5,1	0,4	10,1	$N1^\circ A$
Akranes	VP	100	3,5	5,2	2,7	1,61	-
Hvalnes	YB	29	4,5	13,5	0,8	11,5	$N79^\circ V$
Sandgerði	YB	4	2,8	4,4	0,1	33,3	$N75^\circ A$
Stokksnes	YB	30	7,9	13,5	0,8	13,2	$N73^\circ V$
Stóru Tjarnir	VP	100	4,5	7,5	2,7	2,22	-

¹ VP = Vökvaþrýstipróf, YB = Yfirborun

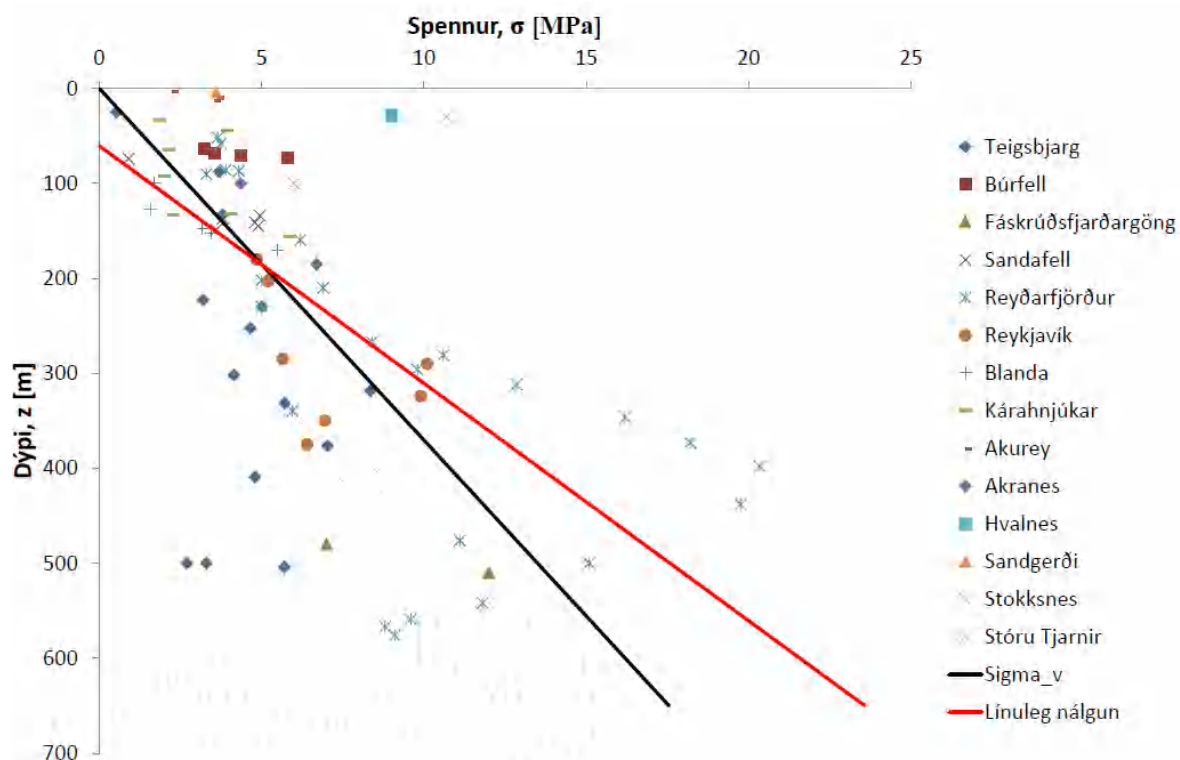
Á stærstum hluta þeirra staða sem taldir eru upp í töflu 5.29 voru bergspennumælingar gerðar með yfirborun en einnig með vökvaþrýstiprófi. Það vekur eftirtekt þegar tafla 5.29 er skoðuð hversu háir k -stuðlarnir eru og þá sérstaklega á litlu dýpi. Sé litið á mynd 2.7 á bls. 8 sést að láréttar spennur í bergi hafa almennt tilhneigingu til að vera mjög háar miðað við lódréttar spennur þegar um lítið dýpi er að ræða.

6. Samantekt og greining

Í kaflanum hér á undan hefur verið farið gegnum heimildir sem til eru um bergspennumælingar á Íslandi og þær skilgreindar fyrir hvern stað fyrir sig. Hér verða niðurstöður allra bergspennumælinga skoðaðar sem ein heild.

6.1. Láréttar spennur

Mynd 6.1 sýnir meðaltal hæstu og lægstu láréttra spenna sem mældar hafa verið á Íslandi ($\bar{\sigma}_h = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2}$) sem fall af dýpi frá yfirborði.



Mynd 6.1: Punktarnir sýna meðaltal hæstu og lægstu láréttra spenna sem mældar hafa verið á Íslandi sem fall af dýpi frá yfirborði. Svarti ferillinn sýnir fræðilegar lóðréttar spennur og sá rauði sýnir línulega nálgun á láréttu spennunum.

6. Samantekt og greining

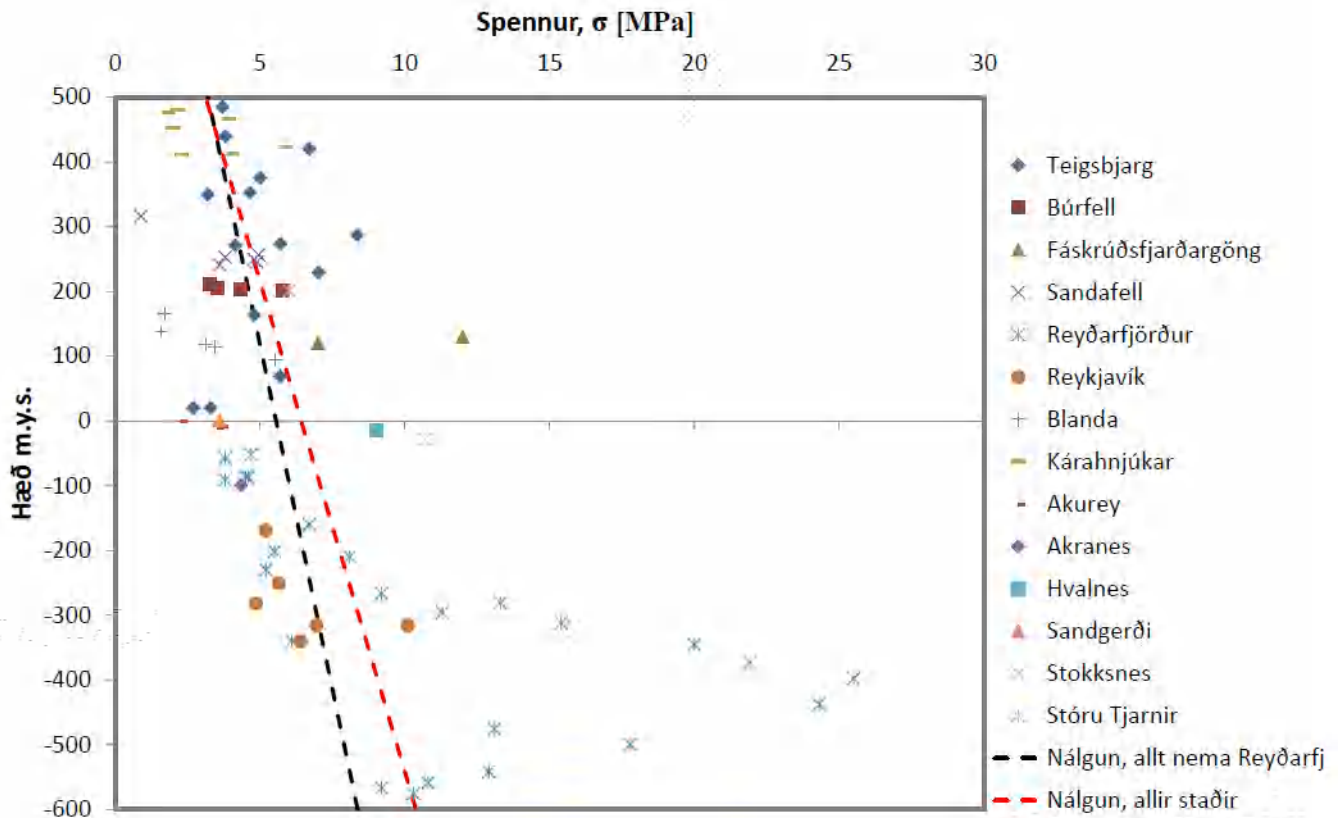
Á myndinni sést að láréttar spennur vaxa nokkuð línulega með dýpi með nokkrum undantekningum þó. Þar má sérstaklega benda á Hvalnes, Sandgerði og Stokksnes en einnig Reyðarfjörð og Teigsbjarg. Láréttar spennur í Hvalnesi, Sandgerði og Stokksnesi eru margfalt hærri en lóðéttar spennur á sama dýpi sem sést vel á háum k -stuðli í töflu 5.29. Þegar komið er niður fyrir 300 m dýpi eru láréttar spennur í Reyðarfirði og Teigsbjargi einnig frábrugðnar lóðréttum spennum á sama dýpi en af því að þar er komið niður á meira dýpi þá verður k -stuðullinn ekki jafn gríðarlega hár/lágur eins og í Hvalnesi, Sandgerði og Stokksnesi. Þær háu láréttu spennur sem mældust í Reyðarfirði á dýpi 300 - 500 m eru athyglisverðar að því leyti að þær eru mun hærri en þær láréttu spennur sem mældust í Teigsbjargi og Fáskrúðsfjarðargöngum en allir þessir staðir eru mjög nálægt hver öðrum, sérstaklega Reyðarfjörður og Fáskrúðsfjarðargöng.

Línuleg nálgun á hæstu og lægstu láréttu spennum (σ_H og σ_h) ásamt meðaltalsnálgun ($\bar{\sigma}_h$), sem fall af dýpi frá yfirborði, er sýnd í töflu 6.1. Fylgnin er ekki sérlega góð og hafa verður það í huga við notkun á jöfnunum.

Tafla 6.1: Línuleg nálgun á láréttum spennum, sem fall af dýpi, fyrir allt Ísland ásamt fylgni.

Nálgun	Fylgni
$\bar{\sigma}_h = 0,04z - 2,42$	0,42
$\sigma_h = 0,04z - 4,66$	0,24
$\sigma_H = 0,06z - 4,16$	0,36

Jarðfræðileg áhrif á niðurstöður spennumælinga eru misjöfn og því er forvitnilegt að skoða í hvaða hæð yfir sjávarmáli bergspennumælingar eru gerðar. Til dæmis má gera ráð fyrir að þættir eins og landslag, rof og sprungur hafi meiri áhrif þegar komið er hátt yfir sjávarmál. Þegar komið er nær sjávarmáli og undir það minnka áhrif þeirra þátta og aðrir þættir eins og flekahreyfingar og þungi bergsins fara ef til vill að hafa meiri áhrif. Mynd 6.2 sýnir meðaltal hæstu og lægstu láréttra spenna líkt og mynd 6.1 gerir en nú eru spennurnar sýndar sem fall af hæð yfir sjávarmáli.



Mynd 6.2: Láréttar spennur $\bar{\sigma}_h$ sem fall af hæð yfir sjávarmáli. Rauðu og svörtu ferlarnir tákna línulega nálgun á spennunum með og án mælinganna frá Reyðarfirði.

Eins og við var að búast þá er mynd 6.2 örlítið breytt miðað við mynd 6.1. Það sýnir sig engu að síður að sé horft á línulegu nálganirnar í gegnum mælipunktana þá aukast láréttar spennur eftir því sem hæð yfir sjávarmáli minnkar. Eins og áður hefur verið nefnt þá eru niðurstöður mælinganna frá Reyðarfirði mjög sérstakar og það breytist lítið þó horft sé á þær sem fall af hæð yfir sjávarmáli. Vegna sérstöðu mælinganna frá Reyðarfirði þá var ákveðið að gera tvær línulegar nálganir, annars vegar með niðurstöðum allra mælinga og hins vegar með niðurstöðum allra mælinga nema frá Reyðarfirði. Línuleg nálgun fyrir þessi tvö tilfelli er sýnd í töflu 6.2.

Tafla 6.2: Línuleg nálgun á láréttum spennum sem fall af hæð yfir sjávarmáli, með og án mælinga frá Reyðarfirði.

Nálgun	Fylgni
¹ $\bar{\sigma}_h = -0,007h + 6,42$	0,24
² $\bar{\sigma}_h = -0,005h + 5,55$	0,20

¹ Allir staðir

² Allir staðir nema Reyðarfjörður

6.2. k -stuðull

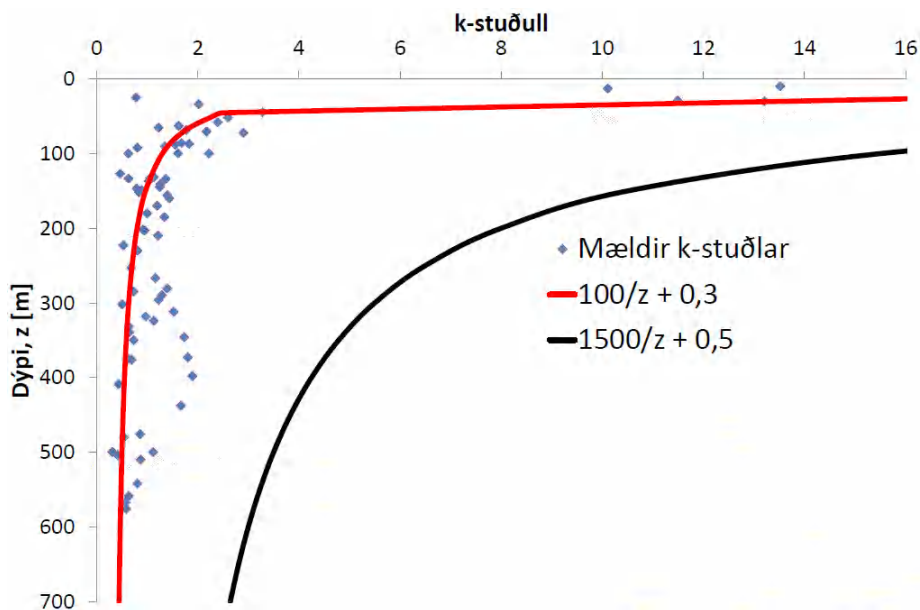
Mynd 6.3 sýnir k -stuðla úr öllum bergspennumælingum á Íslandi sem fall af dýpi ásamt skilgreiningu Hoek og Brown á efri og neðri mörkum k -stuðulsins á heimsvísu, þ.e. skv:

$$\frac{100}{z} + 0,3 < k < \frac{1500}{z} + 0,5 \quad (6.1)$$

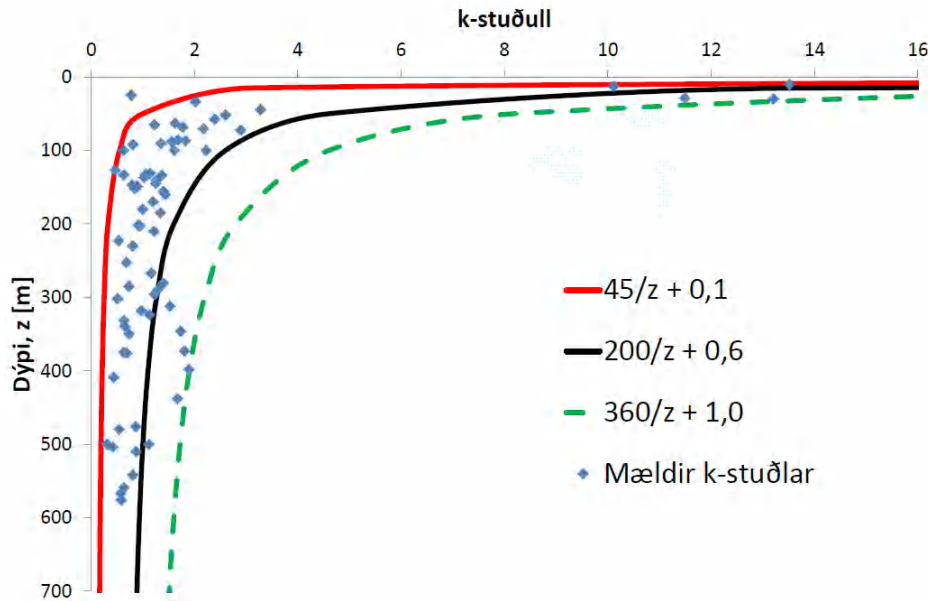
Ljóst er að erlendu mörkin falla illa að íslensku k -stuðlunum. Við ákvörðun á neðri og efri mörkum íslenskra k -stuðla, er miðað við að ~95% punktanna séu innan markanna. Það gefur neðri og efri mörk íslenskra k -stuðla sem

$$\frac{45}{z} + 0,1 < k < \frac{200}{z} + 0,6 \quad \left[\frac{360}{z} + 1,0 \right] \quad (6.2)$$

og má sjá á mynd 6.4. Líkingin sem sýnd er í hornklofanum skilgreinir efri mörk íslenskra k -stuðla sé tekið tillit til afbrigðilegra stuðla frá Reyðarfirði á dýpi 350 - 450 m. Þau mörk eru þó ekki lýsandi fyrir landið í heild og skal því frekar nota hin efri mörkin.



Mynd 6.3: Mældir k -stuðlar á Íslandi ásamt neðri og efri mörkum k -stuðla á heimsvísu skilgreindum af Hoek og Brown, líking (6.1).



Mynd 6.4: Mældir k -stuðlar á Íslandi ásamt neðri og efri mörkum stuðlanna sem löguð hafa verið að íslenskum aðstæðum skv. líkingu (6.2).

Mynd 6.3 gefur skýrt til kynna að k -stuðlar á Íslandi eru mjög lágir miðað við annars staðar í heiminum. Þeir liggja við neðri mörk Hoek og Brown og í mörgum tilfellum eru þeir lægri. Á dýpinu 350 - 450 m eru nokkrir k -stuðlar nálægt miðju bilinu en það eru stuðlar úr mælingunum frá Reyðarfirði sem þóttu nokkuð óvenjulegir fyrir það svæði.

6.3. Formbreytingarstuðull

Í kafla 2.4 var fjallað um tengslin á milli k -stuðuls og formbreytingarstuðulsins E_h . Sé líking Sheorey [jafna (2.6)] notuð, jafngildir skilgreining Hoek og Brown á neðri og efri mörkum k -stuðulsins á heimsvísu formbreytingarstuðli E_h á bilinu:

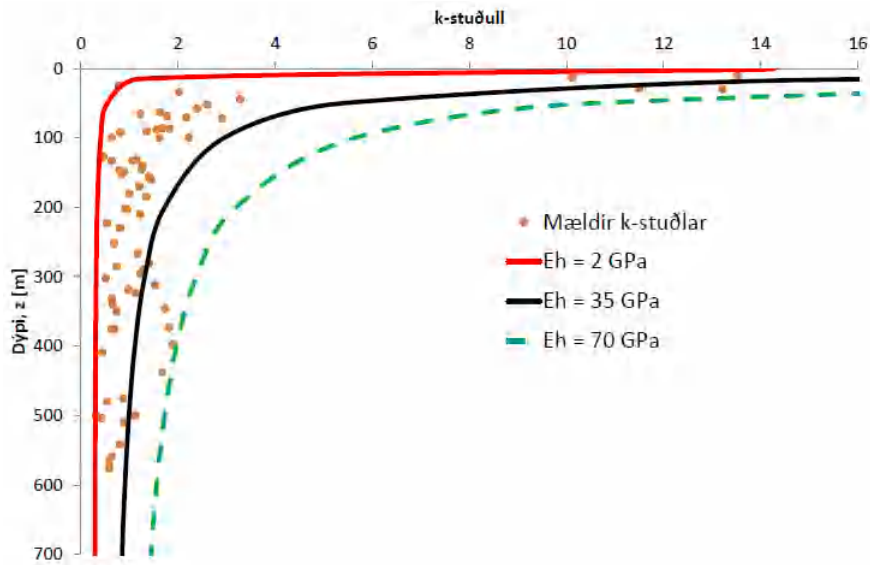
$$14 \text{ GPa} < E_h < 170 \text{ GPa} \quad (6.3)$$

Við ákvörðun á neðri og efri mörkum íslenskra k -stuðla skv. líkingu Sheorey [jafna (2.6)] er miðað við að $\sim 95\%$ stuðlanna séu innan markanna. Fyrir íslenska k -stuðla verður formbreytingarstuðullinn E_h því á bilinu:

$$2 \text{ GPa} < E_h < 35 \text{ GPa} \quad [70 \text{ GPa}] \quad (6.4)$$

Á sama hátt og í líkingu (6.2) þá tákna gildið í hornklofanum efri mörk E_h fyrir íslenska k -stuðla þegar tekið er tillit til afbrigðilegra stuðla á dýpi 350 - 450 m. Þau eru heldur ekki lýsandi fyrir landið í heild og skal því frekar nota hin efri mörkin, þ.e. $E_h = 35 \text{ GPa}$. Mynd 6.5 sýnir mörkin fyrir íslenskar aðstæður úr líkingu (6.4) á grafi.

6. Samantekt og greining



Mynd 6.5: Mældir k -stuðlar á Íslandi ásamt neðri og efri mörkum E_h fyrir íslenskar aðstæður skv. líkingu Sheorey.

Það er ljóst að við samanburð á líkingum (6.3) og (6.4) að formbreytingarstuðullinn E_h þarf að vera mjög lágur ef hann á að lýsa íslenskum k -stuðlum skv. líkingu Sheorey.

Formbreytingarstuðullinn E_h sem notaður er í líkingu Sheorey hefur hér verið ákvarðaður út frá niðurstöðum bergspennumælinga. Ef upplýsingar um bergspennumælingar eru ekki aðgengilegar er einnig hægt að ákvarða formbreytingarstuðulinn út frá Q , E_i og GSI -gildum skv. líkingum Barton o.fl. [jafna (2.7)] og Diederichs & Hoek [jafna (2.11)] sem fjallað var um í kafla 2.4.

Formbreytingarstuðulinn E_h í íslensku basalti skv. líkingu Barton o.fl. [jöfnu (2.7)] er sýndur í töflu 6.3. Í líkingu Barton o.fl. er notast við Q -gildi bergs og gefur berggæðamat á borkjörnum í íslensku basalti mjög oft gildi á bilinu 4 - 20 (Helga Jóna Jónasdóttir, 2015). Stuðst verður við það hér.

Tafla 6.3: Formbreytingarstuðullinn E_h reiknaður skv. líkingu Barton o.fl. [jöfnu (2.7)] þar sem notuð eru úætluð neðri og efri mörk Q -gildis fyrir íslenskt basalt.

	$Q = 4$	$Q = 20$
E_h [GPa]	15,1	32,5

Formbreytingarstuðullinn E_h í íslensku basalti skv. líkingu Diederichs & Hoek [jöfnu (2.11)] er sýndur í töflu 6.4. Í líkingu Diederichs & Hoek er notast við E_i og GSI gildi bergs. E_i er margfeldi MR og σ_{ci} . Til að áætla MR og σ_{ci} er stuðst við hugbúnaðinn *RocLab* frá kanadíska fyrirtækinu *RocScience*. Það inniheldur góðan gagnagrunn með

upplýsingum um fjölmargar bergtegundir, þar á meðal basalt (RocScience, 2015). Nokkuð erfitt getur verið að ákvarða nákvæmlega á hvaða bili GSI er fyrir íslenskt basalt en miðað hefur verið við $GSI \approx 55 \pm 10$ (Vignir Val Steinarsson, 2016. Munnleg heimild) og verður það einnig gert hér.

Tafla 6.4: Formbreytingarstuðullinn E_h reiknaður skv. líkingu Diederichs & Hoek [jöfnu (2.11)] þar sem notuð eru áætluð neðri og efri mörk á E_i og GSI fyrir íslenskt basalt.

		Lægsta	Hæsta
MR	[-]	250	450
σ_{ci}	[MPa]	100	250
E_i	[GPa]	25	113
GSI	[-]	45	65
E_h	[GPa]	5,6	71,1

Að lokum sýnir tafla 6.5 samanburð á bili formbreytingarstuðulsins E_h ákvarðað út frá þeim aðferðum sem greint hefur verið frá hér á undan.

Tafla 6.5: Samanburður á formbreytingarstuðlum skv. líkingum Sheorey, Barton o.fl. og Diederichs & Hoek.

Líking	Jafna	$E_{h,min}$ [GPa]	$E_{h,max}$ [GPa]
Sheorey	(6.4)	2	35 (70)
Barton o.fl.	(2.7)	15	33
Diederichs & Hoek	(2.11)	6	71

Samanburðurinn sem sýndur er í töflu 6.5 sýnir að neðri og efri mörk E_h sem ákvörðuð eru með líkingum Barton o.fl. og Diederichs & Hoek eru að miklu leyti á sama bili og mörkin sem ákvörðuð eru út frá bergspennumælingum í líkingu Sheorey. Hafa þarf í huga að ekki var farið djúpt í að ákvarða stuðlana í líkingum Barton o.fl. og Diederichs & Hoek og má því ekki taka þær útkomur of bókstaflega. Útkomurnar benda þó engu að síður til þess að notkun á þeirra líkingum gefur mjög raunhæf gildi í samanburði við líkingu Sheorey og verða gildin enn áreiðanlegri sé farið dýpra í að ákvarða stuðlana fyrir líkingarnar.

6.4. Stefna σ_H

Í töflu 6.6 eru teknar saman meðalstefnur hæstu lárétu spennu σ_H og þær sýndar á mynd 6.6. Almennt er talið að flekahreyfingar eigi stærstan þátt í hvernig stærð og stefnur láréttra spennu er. Þau gögn og heimildir um bergspennumælingar á Íslandi sem rakin hafa verið hér á undan gefa þó til kynna að fleiri þættir en einungis flekahreyfingar hafi áhrif á stefnur σ_H . Stefnur σ_H í Reykjavík, Akurey, Hvalnesi og Stokksnesi eru hér um bil hornréttar á flekaskil Evrasíu og Norður-Ameríkuflekans. Á suðvestur horni landsins eru stefnur σ_H í Reykjavík og Akurey nokkuð áþekkar en talsvert á skjön við mælingar frá Sandgerði. Því skal þó haldið til haga að aðeins var gerð ein mæling í Sandgerði og var hún einungis á 4 m dýpi. Á Austurlandi er engin ein tilhneiging hvað stefnu σ_H varðar. Stefnurnar á Kárahnjúkum og í Fáskrúðsfjarðargöngum eru nánast hornréttar á stefnur σ_H á Hvalnesi og Stokksnesi.

Tafla 6.6: Meðalstefna hæstu lárétu spennu á nokkrum stöðum á Íslandi ásamt gæðum gagnanna eins og þau eru skilgreind í töflu 2.1.

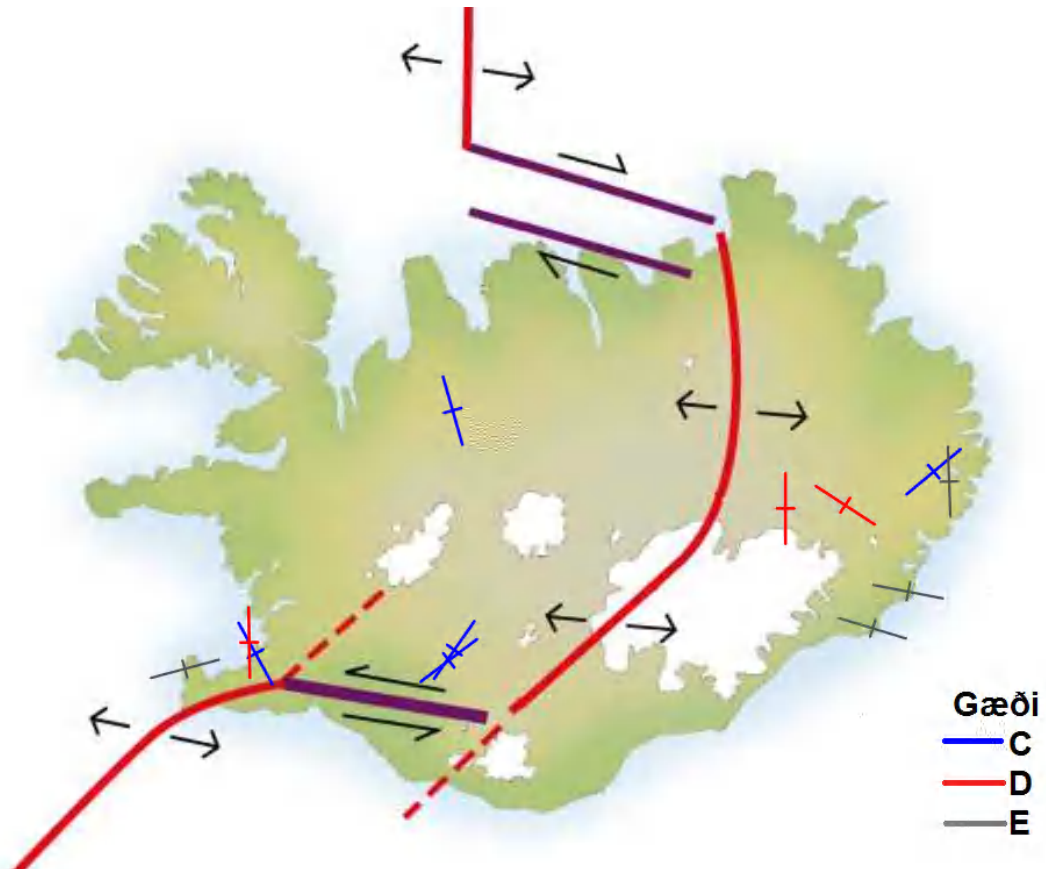
Staður	Meðalstefna σ_H	Gæði
Búrfell	$N53^\circ A \pm 14^\circ$	C
Reykjavík	$^1N29^\circ V \pm 11^\circ$	C
Blönduvirkjun	$N16^\circ V \pm 12^\circ$	C
Reyðarfjörður	$N50^\circ A \pm 21^\circ$	C
Sandafell	$^1N35^\circ A \pm 16^\circ$	C
Teigsbjarg 1981	$^1N56^\circ V \pm 30^\circ$	D
Teigsbjarg 1998	$^1N59^\circ V \pm 27^\circ$	D
Fljótsdalsstöð	-	E
Kárahnjúkar	$N1^\circ A \pm 39^\circ$	D
Fáskrúðsfjarðargöng	$N2^\circ A$	E
Akranes	-	E
Akurey	$N1^\circ V$	D
Hvalnes	$N79^\circ V$	E
Sandgerði	$N75^\circ A$	E
Stokksnes	$N73^\circ V$	E
Stóru Tjarnir	-	E

¹Afbrigðilegar stefnur eru undanskildar í reikningnum.

Tafla 6.7: Skipting gæða á bergspennumælingum á Íslandi. Til samanburðar er sýnd skipting gæða á bergspennumælingum í Evrópu og Norður-Ameríku.

	A	B	C	D	E
Ísland	0	0	31%	25%	44%
Evrópa	3%	7%	46%	31%	13%
N-Ameríka	23%	11%	28%	28%	9%

Eins og er sýnt í töflum 6.6 og 6.7 þá eru gæði bergspennumælinga á Íslandi eins og þau eru skilgreind af WSM heldur léleg og til dæmis uppfylla engar þeirra skilyrðin til að vera af gæðum A eða B. Í þessu samhengi má þó benda á að gæði bergspennumælinga í Evrópu eru heldur ekki mikil. Til að bergspennumælingar uppfylli viss gæði þurfa þær að ná ákveðnum fjölda á hverjum stað, þær þurfa að vera á ákveðið miklu dýpi og staðalfrávik á meðalstefnu σ_H þarf að vera innan vissra marka. Í þeim mælingum sem skoðaðar hafa verið í þessari ritgerð þá er það fyrst og fremst lítill fjöldi mælinga á hverjum stað sem ræður gæðunum. Í flestum tilfellum eru mælingarnar gerðar á miklu dýpi og auk þess eru staðalfrávik á meðalstefnum σ_H í mörgum tilfellum ekki mikil.



Mynd 6.6: Íslandskort sem sýnir stefnu σ_H ásamt rekbeltinu sem liggur í gegnum landið. Mismunandi litir örvanna tákna gæði gagnanna eins og þau eru skilgreind í töflu 2.1 (Emil H. Valgeirsson, 2010). Mynd breytt af höfundu.

Allar bergspennumælingar sem skoðaðar hafa verið í þessari ritgerð voru gerðar á tiltölulega litlu dýpi frá yfirborði, en dýpsta mælingin var gerð á 955 m dýpi í Fáskrúðsfjardargöngum. Almennt gætir áhrifa flekahreyfinga á spennuástand á mun meira dýpi, t.d. verða jarðskjálftar flestir á 2-15 km dýpi (Matthías Loftsson, munnleg heimild. 2016). Niðurstöður á stefnu σ_H í þessari samantekt ráðast þess vegna aðallega af staðbundnum áhrifaþáttum eins og landslagi, rofi, sprungum, misgengjum o.fl. Að einhverju leiti kann það að skýra hversu mismunandi stefnurnar eru eins og sýnt er á mynd 6.6.

7. Lokaorð

Megintilgangur þessa verkefnis var að safna saman á einn stað gögnum um allar bergspennumælingar sem gerðar hafa verið á Íslandi. Þannig mætti hafa þetta rit til hliðsjónar þegar meta á spennuástand á stöðum þar sem til stendur að hefja framkvæmdir á. Niðurstöður mælinganna voru greindar og reynt að sjá hvaða tilhneigingu spennuástand í íslensku bergi hefur.

Farið var í gegnum þrjár mismunandi aðferðir til mælinga á spennum í bergi: *yfirborun*, *vökvaþrýstipróf* og *plötutjökkunarpróf*. Á Íslandi hafa engar bergspennumælingar verið gerðar með plötutjökkun svo vitað sé og var því ekki farið djúpt ofan í þá aðferð. Það er mat höfundar eftir að hafa kynnt sér þessar aðferðir að bergspennumælingar með vökvaþrýstiprófi sé heppilegasta aðferðin þegar kemur að rannsóknum á svæðum þar sem framkvæmdir eru ekki hafnar. Hægt er að framkvæma mælingarnar frá yfirborði jarðar og eru lítil takmörk sett hversu djúpt borað er og mælt.

Við greiningu á gögnunum kom í ljós að láréttar bergspennur eru mjög lágar á Íslandi samanborið það sem gengur og gerist í heiminum sem sýnir sig í lágum k -stuðlum. Á heimsvísu er stærð láréttra spennu breytilegust á litlu dýpi og bil k -stuðulsins því stærst þar en með auknu dýpi minnkar bilið. Þrátt fyrir lága k -stuðla á Íslandi þá hafa láréttar spennur á Íslandi sömu tilhneigingu og á heimsvísu, þ.e. þær eru breytilegastar á litlu dýpi en verða svo stöðugri eftir því sem dýpið eykst. Eini munurinn er að neðri og efri mörkum k -stuðlanna hefur verið hliðrað þannig að þau falli að íslensku stuðlunum.

Samband er á milli k -stuðuls og formbreytingarstuðulsins E_h . Hann var reiknaður út frá niðurstöðum bergspennumælinga á Íslandi skv. líkingu Sheorey og til samanburðar var hann einnig áætlaður út frá líkingum Barton o.fl. og Diederichs & Hoek. Samanburðurinn gaf mjög svipaðar útkomur.

Stefna hæstu láréttu spennu σ_H á Íslandi er mjög mismunandi eftir mælistöðum. Á nokkrum stöðum gat munurinn á stefnu σ_H í sömu borholu verið mikill eftir því á hvaða dýpi mælingarnar voru gerðar. Það gefur þó ekki endilega til kynna að niðurstöður mælinganna séu óáreiðanlegar þar sem jarðfræðilegar aðstæður geta verið ólíkar eftir því á hvaða dýpi mælt er. Á öðrum stöðum eru uppgefnar stefnur σ_H einungis byggðar á einni mælingu og því erfitt að segja hvort niðurstöður þeirra mælinga séu áreiðanlegar. Þegar horft er á landsvæði eins og Austurland sést að mikill munur er á stefnu σ_H á stöðunum þar og gæði gagnanna frekar léleg. Það er því ekki hægt að slá því föstu að spennuástand á Austurlandi í heild ráðist af stefnu flekaskilanna heldur réðust þær frekar af staðbundnum aðstæðum á hverjum stað, svo sem landslagi, jökulrofi, göngum (lag- og berggöngum) o.fl. Mæl-

7. Lokaorð

ingarnar í Reykjavík, Akurey, Hvalnesi og Stokksnesi eru nokkurn veginn samsíða stefnu flekahreyfinganna og má því álykta að flekahreyfingar ráði einhverju um spennuástandið á þessum stöðum. Í *World Stress Map* verkefninu sem fjallað var um í kafla 2.6 er stefna hæstu láréttu spennu einnig metin úr jarðskjálftagögnum en það var ekki skoðað í þessu verkefni.

Vonast er til að þessi samantekt og greining geti einfaldað vinnu í framtíðinni við mat á spennuástandi í íslensku bergi þar sem til stendur að ráðast í framkvæmdir. Höfundur vill þó benda á að spennuástand er mjög fljótt að breytast á milli staða þó svo að fjarlægðin á milli þeirra sé ekki mikil og þarf því að hafa þann fyrirvara á við notkun þessarar samantektar. Þessu riti er ekki ætlað að minnka þörfina á frekari bergspennumælingum á Íslandi heldur er hugsunin frekar sú að hægt sé að hafa ritið til hliðsjónar og samanburðar við önnur gögn. Eins og áður sagði þá eru stefnur σ_H ekki mjög afgerandi og geta þær verið ólíkar innan sama landshluta og einnig eftir dýpi. Matið á neðri og efri mörkum k -stuðulsins verður aftur á móti að teljast nokkuð gott. Áreiðanlegasta leiðin til að meta spennuástand í bergi er sem fyrr alltaf sú að fara á staðinn og framkvæma mælingar. Þannig má auka enn frekar þekkingu á spennuástandi í íslensku bergi.

Að lokum má geta þess að ekki er hægt að útiloka að fleiri bergspennumælingar hafi verið gerðar á Íslandi en þær sem greint hefur verið frá hér.

Heimildir

- Bachau, O. a., & Craig, J. (2009). Strain Transformation and Rosette Gage Theory. 2D Strain Transformation and Mohr's Circle. *Structural Analysis: With applications to Aerospace Structures*, 2(1), 1–7.
- Barla, G., Bonini, M., & Debernardi, D. (2010). Time Dependent Deformations in Squeezing Tunnels. *International Journal of Geoengineering Case Histories*, 2(1), 40. doi: 10.4417/IJGCH-02-01-03
- Ben Ouanas, A., Gunzburger, Y., Lahaie, F., Piguet, J., & Barnichon, J. (2010). Mechanical testing of hollow cores to determine elastic parameters of anisotropic rocks using the CSIRO HI cell. In *Rock mechanics in civil and environmental engineering: European rock mechanics symposium eurock 2010* (bls. 103–106). Lundúnir: Taylor & Francis Group.
- Birgir Jónsson (1984). Undirbúningsrannsóknir vegna jarðganga við vatnsaflsvirkjanir á Íslandi. *Tímarit Verkfræðingafélags Íslands*, 21–43.
- Brady, B., & Brown, E. (1985). *Rock Mechanics for underground mining* (2. útg.). Lundúnir.
- Dahle, H. (2005a). *In Situ Rock Stress in Layered Icelandic Volcanic rocks*. (Skýrsla nr. STF50 F05041). Þrándheimur: SINTEF.
- Dahle, H. (2005b). *In Situ Rock Stress Measurements at Karahnjúkar Hydro Power Plant (Drög)* (Skýrsla). Þrándheimur: SINTEF.
- Dahle, H., & Larsen, T. (2005). *IN-SITU ROCK STRESS MEASUREMENTS. Brief description of methods applied by SINTEF* (Skýrsla). Þrándheimur: SINTEF.
- Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7. útg.). Stamford: Cengage Learning.
- de Vallejo, L. G., & Ferrer, M. (2011). *Geological Engineering* (1. útg.). Leiden: CRC Press/Balkema.
- The Development of Rock Engineering. (2015). Í *Bergmekanikk vk* (bls. 13). Þrándheimur: NTNU.
- Diederichs, M. (2014). When does brittle failure become violent? Spalling and rockburst characterization for deep tunneling projects. Kingston: Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 - Tunnels for a better Life.

- Durrheim, R. (2010). Mitigating the risk of rockbursts in the deep hard rock mines of South Africa : 100 years of research Mitigating the risk of rockbursts in the deep hard rock mines of South Africa : 100 years of research. (Febrúar), 156–171.
- Eberhardt, E. (2004). In Situ Stresses & Stress Measurements. (bls. 17, 20).
- Emil H. Valgeirsson (2010). *Emil H. Valgeirsson*. Sótt 20. nóvember 2015 af <http://emilhannes.blog.is/blog/emilhannes/entry/1008217/>
- Erlingsson, S. (2013a). *Engineering Rock Mechanics. Lecture Notes, draft*. Reykjavík.
- Erlingsson, S. (2013b). *Rock Support Interaction Analysis*. Reykjavík.
- Guðbjartur Kristófersson (2013). *Jarðfræðiglósur*. Sótt 10. febrúar 2016 af <http://www.mr.is/~gk/jfr/ordskyr/n/bergm-isl.htm>
- Guðmundur Ómar Friðleifsson (e.d.). *Ferlir*. Sótt 23. febrúar 2016 af <http://www.ferlir.is/?id=8071>
- Hagen, S. A. (2015). Bergspenningsmálanger - muligheter og begrensninger. (bls. 8, 41). Prándheimur: SINTEF.
- Haimson, B. (1977). Design of underground powerhouses and the importance of preexcavation stress measurements. In *Design methods in rock mechanics* (bls. 197–204). Madison: American Society of Civil Engineers.
- Haimson, B. (1981a). *Hydrofracturing stress measurements Hole SF-18 Sandafell* (Skýrsla). Madison.
- Haimson, B. (1981b). *Hydrofracturing stress measurements in hole FV-1 Teigsbjarg* (Skýrsla). Madison.
- Haimson, B., & Ingimarsson, A. K. (2007). Hydraulic fracturing stress measurements in Iceland and the design of two hydroelectric power projects. *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands, Vols 1 and 2: Vol: Fundamentals, New Technologies & New Ideas; Vol 2: Case Histories*, 1047–1054.
- Haimson, B., & Rummel, F. (1981). *Hydrofracturing stress measurements in the IRDP drillhole at Reydarfjordur, Iceland* (Skýrsla).
- Haimson, B., & Voight, B. (1977). Crustal Stress in Iceland. *Pure and Applied Geophysics*, 115(1).
- Hast, N. (1967). *The state of stress in the bedrock at Burfell Iceland* (Skýrsla). Stokk-hólmur.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D., & Müller, B. (2008). *The World Stress Map database release 2008*. doi: 10.1594/GFZ.WSM.Rel2008
- Helga Jóna Jónasdóttir (2015). *Bergstyrkingar í Norðfjarðargöngum. Samanburður uppsettra styrkinga við Q-kerfið ásamt tölulegri greiningu* (Meistaraprófsritgerð). Háskóli Íslands.

- Hoek, E. (2006). *Practical Rock Engineering*. Vancouver. doi: 10.2113/gsegeosci.14.1.55
- Hoek, E., Carranza, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-brown failure criterion – 2002 edition. *Narms-Tac*, 267–273.
- Hudson, J., & Harrison, J. (2002). *Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles*. Oxford.
- Kaiser, P., McCreath, D., & Tannant, D. (1996). *Canadian Rockburst Support Handbook*.
- Kim, K., & Franklin, J. (1987). ISRM Suggested methods for rock stress determination. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 24(I).
- Klasson, H., Lindblad, K., Lindfors, U., & Andersson, S. (2002). *Overcoring Rock Stress Measurements in Borehole KOV01, Oskarshamn* (Skýrsla).
- Klee, G., & Rummel, F. (1998a). *Geophysical Borehole Investigations from September 14 - 27, 1998. Result Report Part 1*. (Skýrsla). Regensburg: Amberg Measuring Technique.
- Klee, G., & Rummel, F. (1998b). *Geophysical Borehole Investigations from September 14 - 27, 1998. Result Report Part 2/1*. (Skýrsla). Regensburg: Amberg Measuring Technique.
- Landsvirkjun. (2016). *Aflstöðvar*. Sótt 27. janúar 2016 af <http://www.landsvirkjun.is/fyrirtaekid/aflstodvar>
- Li, C. C. (2010). *Rock Mechanical Principles / Investigation and Monitoring Methods*. (bls. 17). Þrándheimur.
- Loftsson, M., Ingimarsson, A. K., & Jóhannsson, Æ. (2006). In situ rock mass stresses in Iceland and rock mass deformation of underground caverns in the Karahnjúkar and Blanda Hydroelectric Projects. *In-Situ Rock Stress Measurement, Interpretation and Application*, 289–296.
- Loftsson, M., Jóhannsson, Æ. & Erlingsson, E. (2005). *Karáhnjúkar Hydroelectric Project - Powerhouse Cavern. Successful excavation despite complex geology and stress induced stability problems*. (Skýrsla).
- Mining Measurements Services*. (2010). Sótt 20. september 2015 af <http://www.mmsstress.com.au/images/hf.JPG>
- Palmström, A., & Stille, H. (2015). *Rock Engineering* (2. útg.). Lundúnir.
- Páll Ólafsson (1984). Búrfellsvirkjun - jarðgangagerð. *Tímarit Verkfræðingafélags Íslands*, 69(2-4), 45.
- Reinecker, J., Stephansson, O., & Zang, A. (2008). Stress analysis from overcoring data.
- RocScience. (2015). *RS2*. Sótt 13. desember 2015 af <https://www.rocscience.com/rocscience/products/rs2>

- Kristján Sæmundsson & Einar Gunnlaugsson (1999). *Íslenska steinabókin* (2. útg.). Reykjavík: Mál og Menning.
- Sankar, S. (2011). *In situ stress measurements*. Sótt 28. september 2015 af <http://www.slideshare.net/sankarsulimella/in-situ-stresses-and-measurement>
- Sigurður Steinþórsson (2012). *Vísindavefurinn*. Sótt 26. nóvember 2015 af <http://www.visindavefur.is/svar.php?id=59542>
- Tingay, M., Mueller, B., Reinecker, J., Heidbach, O., Wenzel, F., & Fleckenstein, P. (2005). Understanding tectonic stress in the oil patch; the World Stress Map Project. *Leading Edge (Tulsa, OK)*, 24(12), 1276–1282. Sótt af https://cert3.engineeringvillage.com/blog/document.url?mid=grf_M6c6df145148569da35d22b310178163244&database=grf doi: 10.1190/1.2149653
- Vegagerðin*. (2015). Sótt 3. september 2015 af <http://www.vegagerdin.is/vegakerfid/jardgong/jardgvegakerf/>
- Ziaie Moayed, R., Izadi, E., & Fazlavi, M. (2012). In-situ stress measurements by hydraulic fracturing method at Gotvand Dam site, Iran. *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, 36(3), 179–194.
- Þorgrímsson, S., Loftsson, M., & Jensson, O. (1991). Iceland's Blanda Hydroelectric Project: Monitoring of Deformations, Rock Support and Testing of Rock Anchors in the Powerhouse Cavern. *Tunneling and Underground Space Technology* 1, 6, 235–239.

A. Mælingar Haimson&Rummel í Reyðarfirði, 1981 - sýnishorn

TABLE 1. Hydrofracturing Field Data

Test No.	Depth m	P _o MPa	P _c MPa	P _r MPa	P _s MPa	Vert. Frac Orientation
A	33	0.3	(2.8)	(1.7)	-	-
4	42	0.4	-	-	-	NT
5	52	0.5	8.1	2.6	2.6	-
B	58	0.6	7.7	6.7	3.7	S78°E*
6	86	0.8	7.4	4.6	3.3	N52°E
2	87	0.8	8.4	6.6	4.0	-
C	90.5	0.9	8.3	3.7	2.8	N47°E*
D	115.5	1.2	6.1	3.0	1.1	-
E	142	1.4	5.6	3.5	2.4	S35°E*
F	151	1.5	(2.6)	(1.6)	-	-
22	160	1.6	12.6	8.8	5.7	N45°E
G	180	1.8	(6.6)	(1.8)	-	-
3	202	2.0	8.2	5.9	4.5	NT
7	210	2.1	8.7	6.9	5.7	N35°E
H	230	2.3	12.3	6.9	4.8	-
8	267	2.6	12.9	11.0	7.6	N50°E
21	281	2.8	9.4	7.6	7.9	NT
J	296	3.0	11.3	10.6	8.3	-
9	312	3.1	14.7	12.4	10.3	N75°E
K	320.7	3.2	7.6	5.5	4.2	-
L	339.5	4.0	9.1	7.3	5.8	-
10	346	3.4	14.8	13.8	12.4	N35°E
20	373	3.7	19.6	17.9	14.5	NT
11	398	3.9	-	16.2	15.2	N32°E
12	438	4.3	19.5	17.0	15.2	N72°E
13	476	4.7	10.9	9.5	9.1	NT
14	500	4.9	19.0	14.5	12.4	N85°E
19	542	5.3	18.4	13.9	10.7	N23°E
15	559	5.5	12.7	8.9	8.4	NT
18	567	5.6	12.8	10.4	8.4	NT
16	576	5.7	10.1	7.7	7.9	NT
17	582	5.7	-	-	-	NT

*-In these tests a magnetic orienting tool was used to determine fracture attitude.

NT-Fracture impression and orientation not taken.

()-Uncertain values.

-Letter tests refer to those conducted by RUB; number tests were conducted by UW.

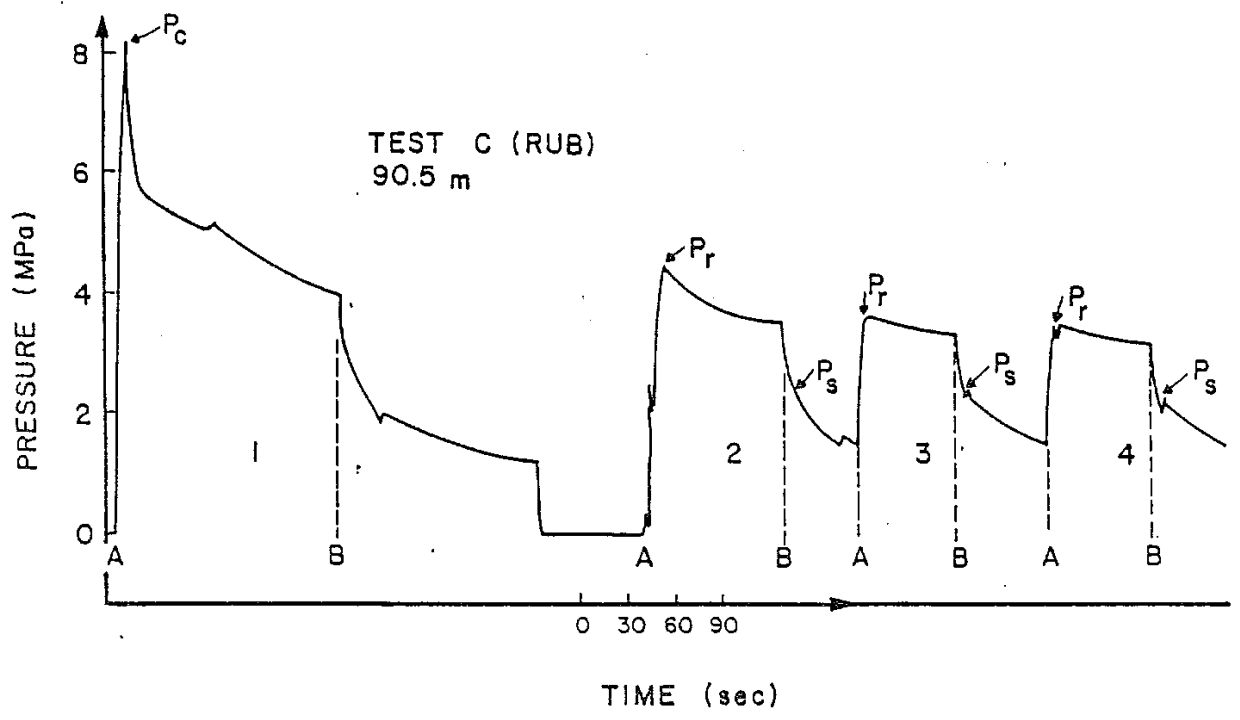


Figure 5a

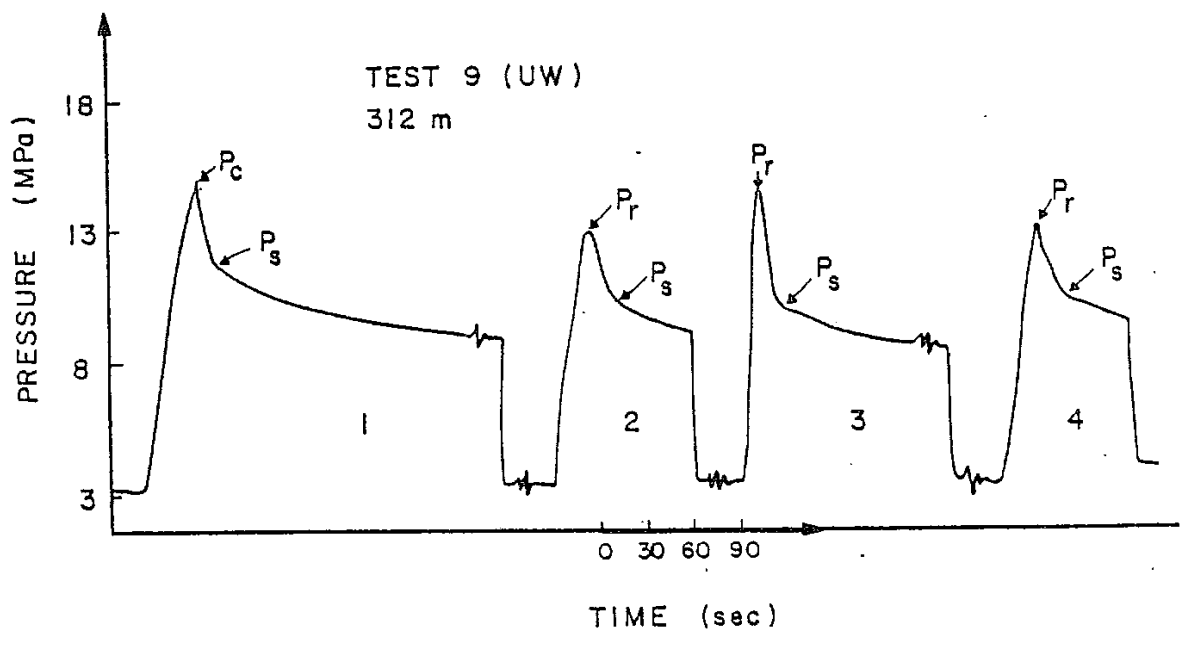


Figure 5b

TABLE 2. Stress Magnitudes and Directions

Test No.	Depth m	σ_v MPa	σ_{Hmin} MPa	σ_{Hmax} MPa	σ_{Hmax} Direction
A	33	.9	-	-	-
4	42	1.1	-	-	-
5	52	1.4	2.6	4.7	-
B	58	1.6	3.7	3.8	-
6	86	2.3	3.3	4.5	N52°E
2	87	2.4	4.0	4.6	-
C	90.5	2.5	2.8	3.8	-
D	115.5	3.2	(1.1)	(-.9)	-
E	142	3.9	(2.4)	(2.3)	-
F	151	4.1	-	-	-
22	160	4.4	5.7	6.7	N45°E
G	180	4.9	-	-	-
3	202	5.5	4.5	5.5	-
7	210	5.8	5.7	8.1	N35°E
H	230	6.3	4.8	5.2	-
8	267	7.3	7.6	9.2	N50°E
21	281	7.7	7.9	13.3	-
J	296	8.1	8.3	11.3	-
9	312	8.6	10.3	15.4	N75°E
K	320.7	8.8	(4.2)	(3.9)	-
L	339.5	9.3	5.8	6.1	-
10	346	9.5	12.4	20.0	N35°E
20	373	10.2	14.5	21.9	-
11	398	10.9	15.2	25.5	N32°E
12	438	12.0	15.2	24.3	N72°E
13	476	13.1	9.1	13.1	-
14	500	13.7	12.4	17.8	N85°E
19	542	14.9	10.7	12.9	N23°E
15	559	15.3	8.4	10.8	-
18	567	15.6	8.4	9.2	-
16	576	15.8	7.9	10.3	-
17	582	16.0	-	-	-

Values given in parantheses are suspect because they show a larger σ_{Hmin} than σ_{Hmax} . Letter tests refer to those conducted by RUB; number tests were conducted by UW.

B. Mælingar SINTEF í Fáskrúðsfjarðargöngum, 2005 - sýnishorn



5 Stress measurement results

5.1 3D measurements

For calculation of the in situ rock stress, the in house computer program DISO is used (Determination of In situ Stress by Overcoring (Version 3.5)). This program, developed at SINTEF Rock and Soil Mechanics, computes the in situ stress from 3D overcoring and, if available, 2D doorstopper measurements. By randomly selecting strain readings from different measurements in the hole, up to 35 000 group of results can be yielded. These results lead to statistical calculations where the mean values and deviations of the computed principal stresses are presented.

The input data from the measurements are checked carefully in order to remove obvious erroneous readings. This includes a thorough visual inspection of the cores after overcoring.

For the calculation the mechanical properties in table 2 Appendix G are used. Cores from the measuring points are tested in either axial compression test, or biaxial cell test with the 3D cell connected after overcoring. In those tests, the cores are loaded with a controlled pressure, and the resulting strains recorded. In this way, Young's modulus and Poisson's ratio values, which includes effects from the measuring system can be obtained, as well as a control if all single measuring cells are working properly.

The 3D rock stress measurement results are presented in Appendix C and figure 5-1 and 5-2. The orientation of the principal stresses is presented as lower hemisphere stereographic projection.

From figure 5-1, 5-2 and Appendix C follow:

Hole 1 (chainage 6530)

The major principal stress $\sigma_1 = 25.6 \text{ MPa} \pm 6.1 \text{ MPa}$, has a trend of 14° from N and plunge of 68° . i.e. relatively steep dipping.

The intermediate stress $\sigma_2 = 8.4 \text{ MPa} \pm 3.0 \text{ MPa}$, has a trend of 170° from N and plunge of 21° . i.e. relatively flat lying.

The minor principal stress $\sigma_3 = 2.2 \text{ MPa} \pm 4.9 \text{ MPa}$, has a trend of 253° from N and a plunge of 8° . i.e. relatively flat lying.

Vertical stress:	$\sigma_v = 23 \text{ MPa}$
Maximum horizontal stress:	$\sigma_{h \text{ max}} = 11 \text{ MPa}$ trending 170°
Minimum horizontal stress:	$\sigma_{h \text{ min}} = 3 \text{ MPa}$ trending 89°

Hole 2 (chainage 7085)

No measurements performed due to extremely poor rock quality (scoria).



Hole 3 (chainage 7615)

The major principal stress $\sigma_1 = 22.2 \text{ MPa} \pm 4.9 \text{ MPa}$, has a trend of 184° from N and plunge of 14° . i.e. relatively flat lying.

The intermediate stress $\sigma_2 = 14.9 \text{ MPa} \pm 4.3 \text{ MPa}$, has a trend of 41° from N and plunge of 73° . i.e. relatively steep dipping.

The minor principal stress $\sigma_3 = 1.4 \text{ MPa} \pm 5.5 \text{ MPa}$, has a trend of 276° from N and a plunge of 10° . i.e. relatively flat lying.

Vertical stress: $\sigma_v = 15 \text{ MPa}$
 Maximum horizontal stress: $\sigma_{h \text{ max}} = 22 \text{ MPa}$ trending 6°
 Minimum horizontal stress: $\sigma_{h \text{ min}} = 2 \text{ MPa}$ trending 96°

Comparing the stress pattern at the two locations, the principal stress directions coincides quite well, with a general approximate horizontal / vertical trend with an approximate N-S / E-W orientation. However, the maximum and intermediate principal stresses change places at the two locations.

The maximum and minimum horizontal stresses are trending approximately N-S and E –W respectively. According to the tectonic rose diagram, many of the dominating tectonic lineaments in the area have the same trend.

Theoretically, gravity will induce vertical and horizontal stresses in a rock mass given by:

Vertical stress: $\sigma_v = \rho \cdot g \cdot h$

Horizontal stress: $\sigma_h = \frac{\nu}{1 - \nu} \cdot \sigma_v$

Where h = vertical overburden (m)
 ν = Poisson's ratio= 0.16
 g = acceleration of gravity = 9.81 m/s^2
 ρ = average unit weight of the rock mass = 2900 kg/m^3

This gives the following theoretical stresses at the different locations:

Hole 1 (Chainage 6530) h = 670:	$\sigma_{v \text{ theor}} = 19 \text{ MPa}$	$\sigma_{h \text{ theor}} = 4 \text{ MPa}$
Hole 2 (Chainage 7085) h = 940:	$\sigma_{v \text{ theor}} = 27 \text{ MPa}$	$\sigma_{h \text{ theor}} = 5 \text{ MPa}$
Hole 3 (Chainage 7615) h = 510:	$\sigma_{v \text{ theor}} = 14.5 \text{ MPa}$	$\sigma_{h \text{ theor}} = 2.5 \text{ MPa}$
Hole 4 (Chainage 4208) h = 100:	$\sigma_{v \text{ theor}} = 3 \text{ MPa}$	$\sigma_{h \text{ theor}} = 0.6 \text{ MPa}$

When measuring rock stress successfully, the measured vertical stress normally coincides quite well with the theoretical vertical stress, provided that there are no major geological disturbances close to the measuring site (Myrvang 2001).

In this case, the measured vertical stress at Hole 1 is 23 MPa, whereas the theoretical value is 19 MPa, i.e. the measured value is somewhat higher but still in the same order of magnitude.

At Hole 3 the measured vertical stress of 14.9 MPa coincides perfectly with the theoretical value of 14.5 MPa.

Comparing the measured maximum horizontal stress with the theoretical values gives a completely different picture:

At Hole 1 the measured maximum horizontal stress is 11 MPa, compared with the theoretical value of 4 MPa, i.e. the measured stress is almost 3 times the theoretical value.

At Hole 3 the measured maximum horizontal stress is 22 MPa, compared with the theoretical value of 2.5 MPa, i.e. the measured stress is almost 9 times the theoretical value.

This indicates that a considerable compressive tectonic stress acts in an approximately N – S direction in the area. Regionally, this stress probably acts parallel with the major tectonic lineaments. High horizontal stresses have been reported previously in Iceland (World Stress Map, Schäfer, 1978).

Comparing the measured minimum horizontal stress with the theoretical values gives:

At Hole 1 the measured minimum horizontal stress is 3 MPa, compared with the theoretical value of 4 MPa, i.e. the measured stress is a little lower than the theoretical stress.

At Hole 3 the measured minimum horizontal stress is 2 MPa, compared with the theoretical value of 2.5 MPa, i.e. also a little lower than the theoretical value.

This indicates a low stress perpendicular to the major, vertical lineaments in the area as predicted in the geological report (Guðmundsson & Hallsteinnsson, 2001)

C. Mælingar Nils Hast í Búrfellsvirkjun, 1967 - sýnishorn

C. Mælingar Nils Hast í Búrfellsvirkjun, 1967 - sýnishorn

Búrfell, Iceland

Stress measurement in the wal

Mp 4

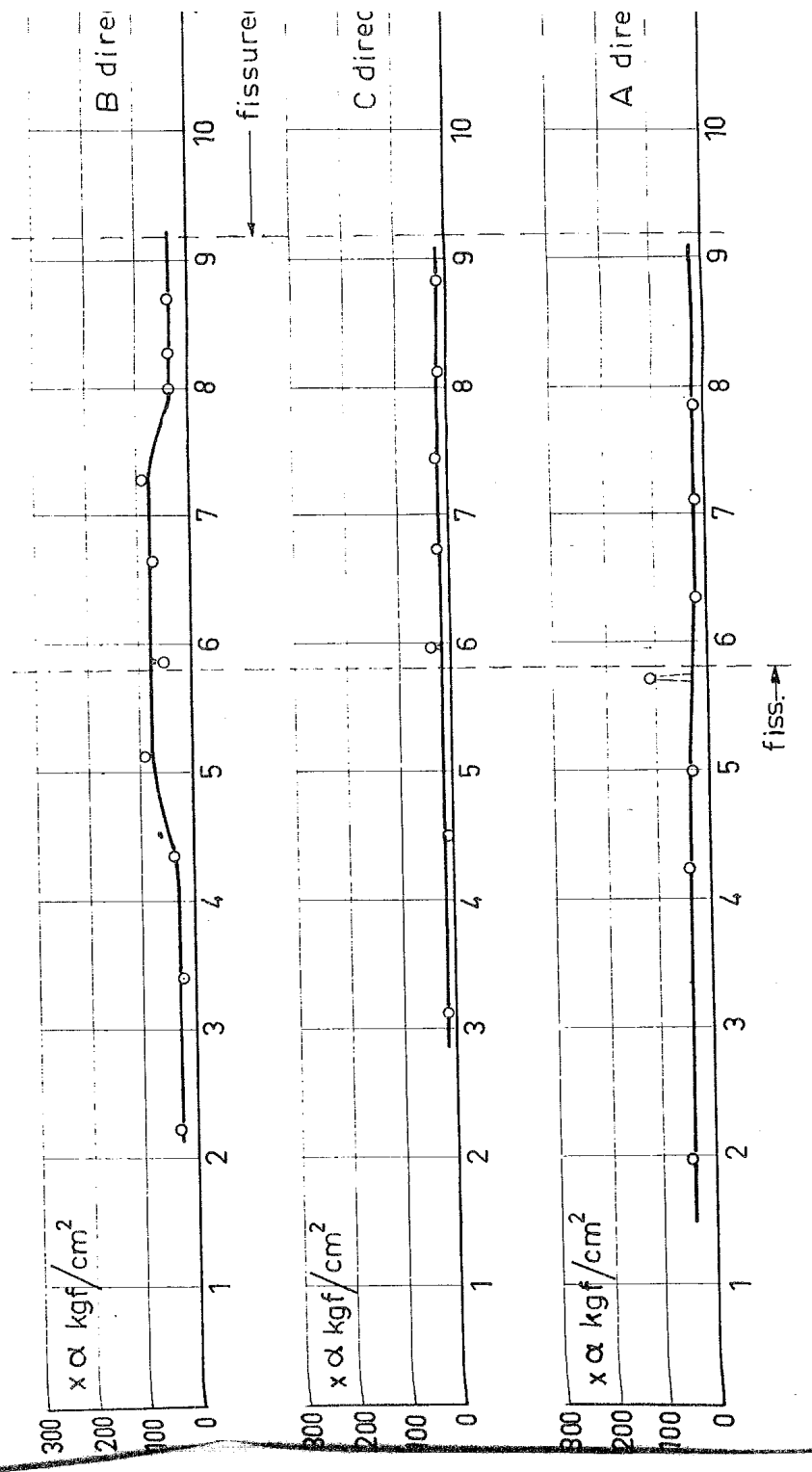
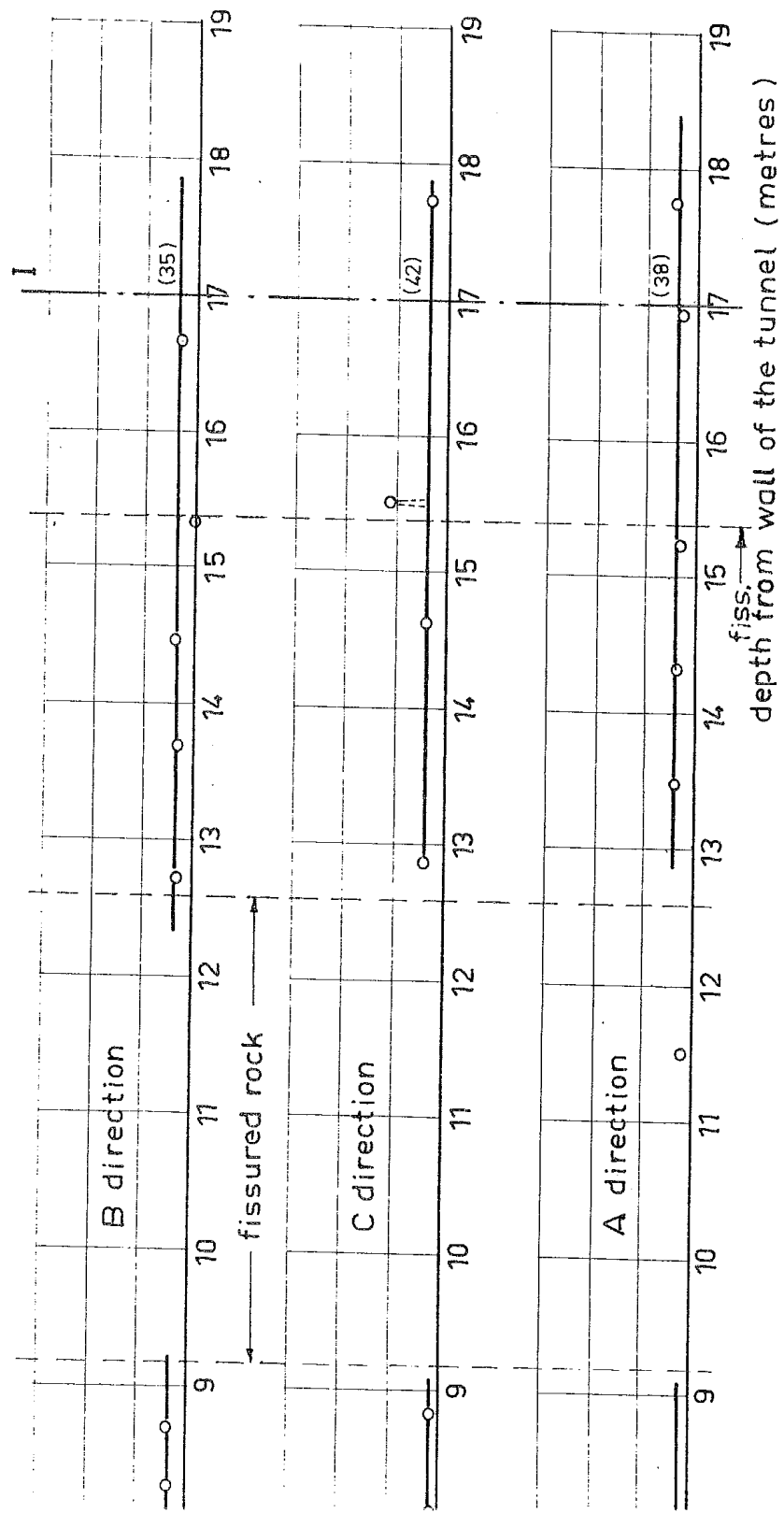
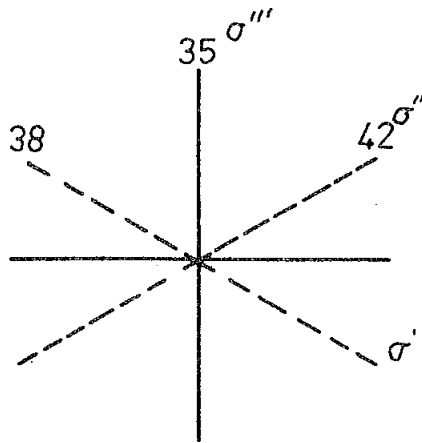


Fig. 8
 Professor Nils Hast
 Rock Stress Measurements AB
 Stockholm

measurement in the wall of the main tunnel



Mp 4 , Burfell, IcelandCalculation of principal stresses

Section I depth 17 metres

$$\sigma' = 38 \alpha \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma'' = 42 \alpha$$

$$\sigma''' = \frac{35 \alpha}{115 \alpha \text{ kgf/cm}^2}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\alpha}{2} \left\{ 115 + \sqrt{\frac{1}{2}(16 + 49 + 9)} \right\} \\ \sigma_2 &= \frac{\alpha}{2} \left\{ 115 - \sqrt{\frac{1}{2}(16 + 49 + 9)} \right\} \end{aligned} \right.$$

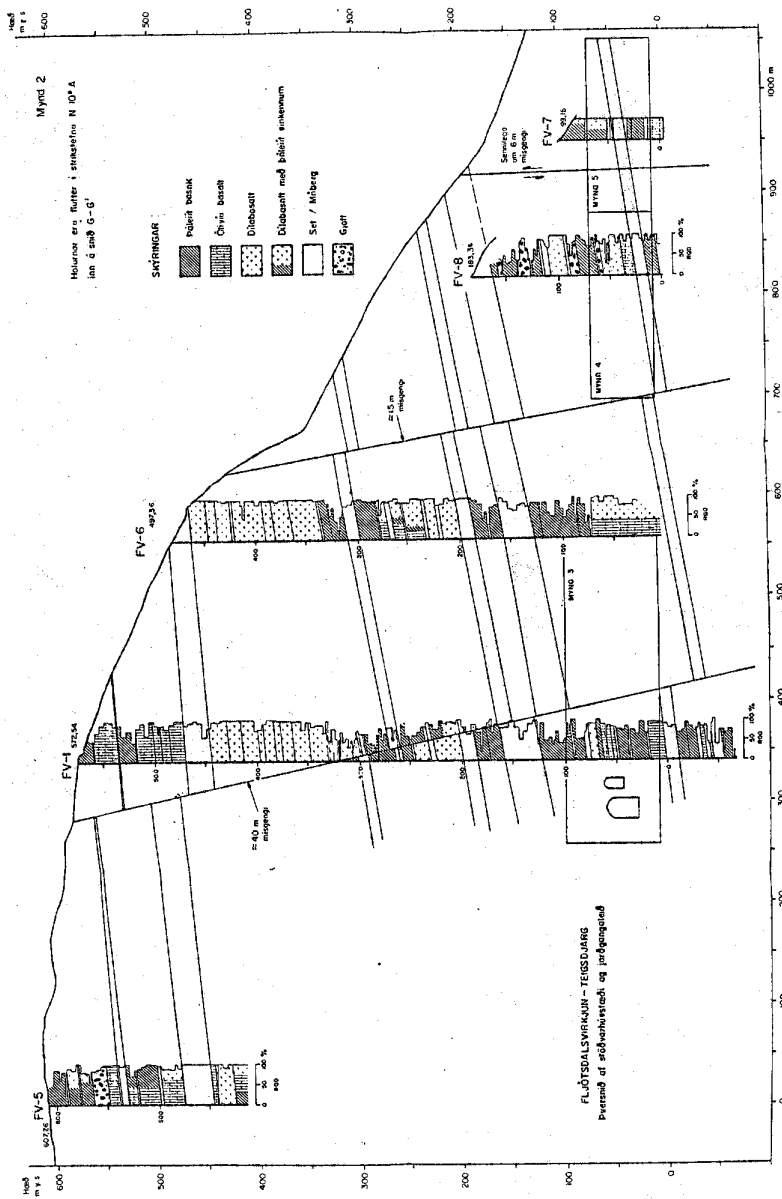
$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\alpha}{2} (115 + 6) = 61 \alpha \\ \sigma_2 &= \frac{\alpha}{2} (115 - 6) = 54 \alpha \end{aligned} \right.$$

$$\alpha = 0,37$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_1 &= 61 \cdot 0,37 = 23 \text{ kgf/cm}^2 \\ \sigma_2 &= 54 \cdot 0,37 = 20 \text{ — " —} \\ \tau_{max} &= 1 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned} \right.$$

The shearing stress in vertical direction allmost zero.

D. Teigsbjarg - þversnið af borholum



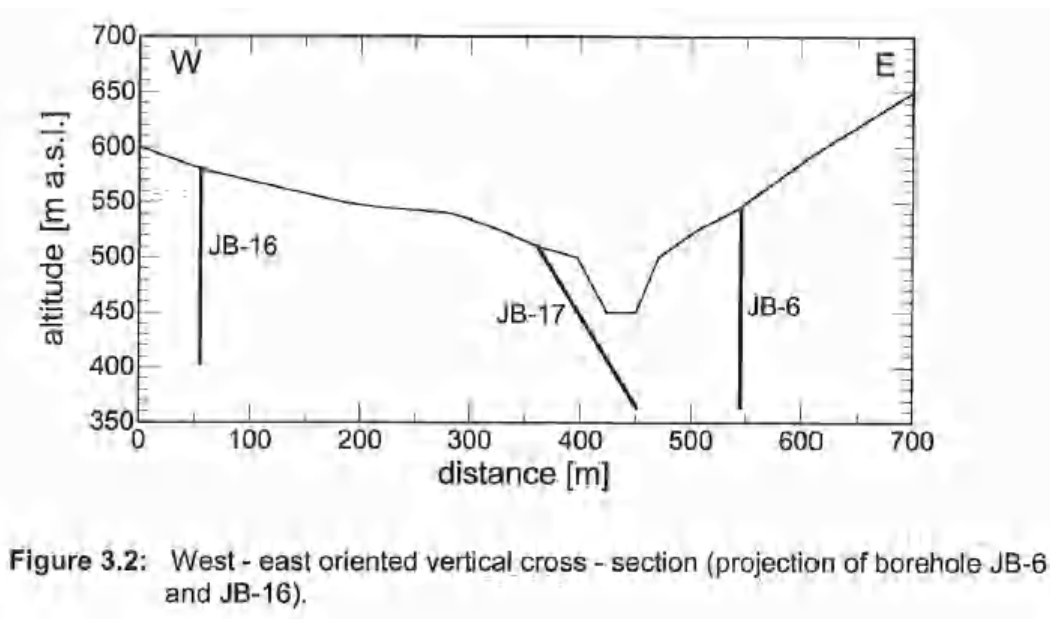
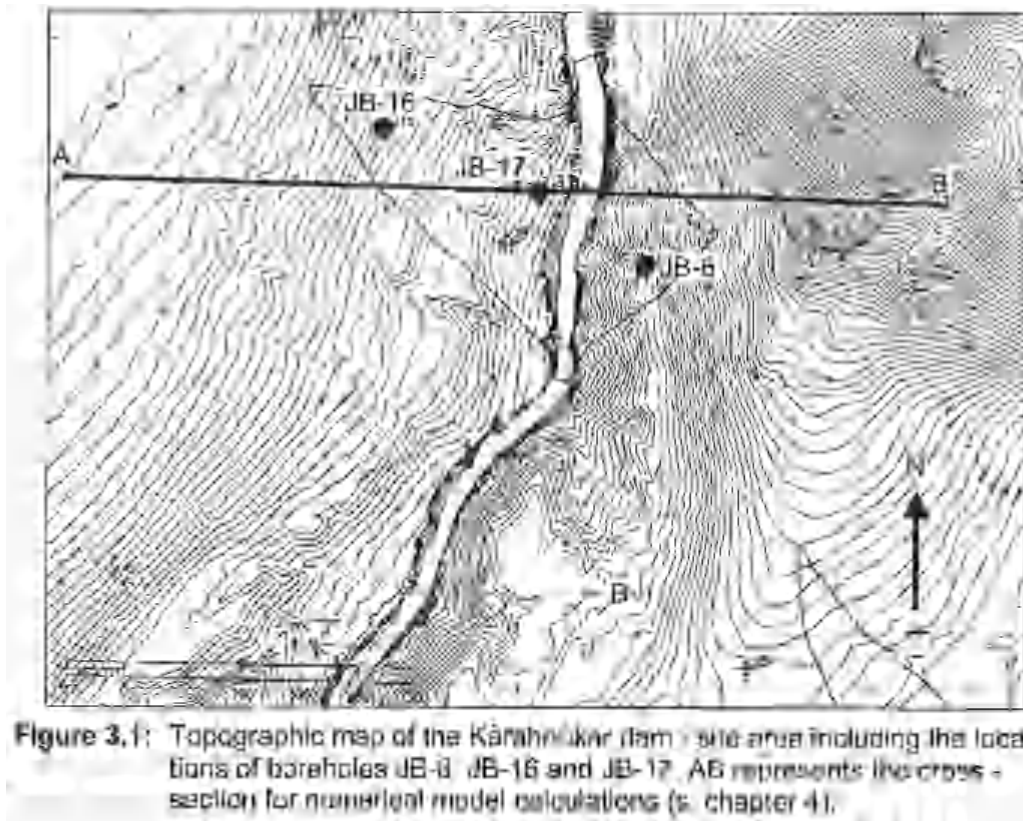
25

Figure 3. Vertical profile along a line connecting boreholes FV-5, FV-1 and FV-6 including lithology and showing location of the planned powerhouse.

E. Mælingar Amberg á Kárahnjúkum



Figure 2.1: Photo showing the MeSy winch system MKW-500, the straddle packer tool PERFRAC II and the injection pumps at the location of well JB-17.



F. Bergbrot (e. spalling) í Fljótsdalsstöð

Eftirfarandi myndir eru úr skýrslunni „Kárahnjúkar Hydroelectric Project - Powerhouse Cavern” (Loftsson o.fl., 2005).



Figure 19. Spalling in the busduct tunnels



Figure 20. Spalling in the distributor tunnels



Figure 21. Bent bolt plates and nut pushed through the spherical ring



Figure 22. Chainlink mesh on the spalling area above the crane beam in powerhouse