

TGB4930: Ingeniørgeologi og bergmekanikk  
masteroppgave

Student: Mayuran Vasantharajan

## Vurdering av underjordsuttak ved Akselberg



Trondheim, våren 2020

NTNU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi

Institutt for geovitenskap og petroleum



## MASTEROPPGAVEN

**Kandidatens navn:** Mayuran Vasantharajan

**Oppgavens tittel:** Vurdering av underjordsuttak ved Akselberg

**English title:** Assessment of underground mining at Akselberg

**Utfyllende tekst:** Benytte kunnskap og informasjon som er fremkommet fra arbeidet i prosjektoppgaven til analyse av lokalmålte bergspenninger og andre bergmekaniske egenskaper. Dette skal anvendes i masteroppgaven i empirisk, analytisk og numerisk verktøy for orientering av bergrom, design av rom og pilarer for kalksteinsressurser i Akselberg.

Oppgaven gjennomføres i samarbeid med Norsk Mineral as som kandidaten har hatt kontakt med gjennom arbeidet.

Ansvarlig faglærer og hovedveileder for oppgaven er prof. II Eivind Grøv, Institutt for geologi og bergteknikk.

**Studieretning:** Teknisk geologi

**Hovedprofil:** Ingeniørgeologi/bergteknikk

**Tidsrom:** 15.01.2020-15.06.2020

---

*Eivind Grøv*

*Faglærer*

SKJEMAET TAS INN SOM SIDE 1 I MASTEROPPGAVEN  
NTNU, 16 mai 2020

---

## Sammendrag

Produksjonen av kalkstein fra dagbruddet på Akselberg ønskes å utvides til underjordsuttak av Brønnøy Kalks AS. I den sammenheng er det ønskelig å finne gunstig orientering- og dimensjoner av både bergrom og pilarer for underjordsuttaket. Inngangsparametere for empiriske-, analytisk- og numerisk verktøy er basert på prosjektoppgaven, ”Forståelse av geologiske prosesser og en strukturegeologisk analyse i Akselbergområdet til hjelp for analyse av de lokale målte bergspenninger ved Brønnøy Kalk AS sitt fremtidige underjordsanlegg”, skrevet av undertegnede i faget TGB4500 ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU høsten 2019 med noen korrigeringer. I denne avhandlingen er det brukt spenningsorientering, -regime og andre bergmekaniske egenskaper fra Akselberg. Her er vertikalspenningen justert til 8 MPa, da den teoretisk utregnede og lokalmålte spenningen avviker fra hverandre.

Fra analysen av stabilitetsforhold, sprekker og svakhetsoner kommer det frem at det eksisterer fire sprekkesett, der tre dominerer. Den siste, S4 velges å se bort i fra da den er av liten størelsesorden. Det velges derfor å se på de tre sprekkesettene, S1, S2 og S3. Fra analysen kommer det frem at den beste orienteringen av bergrommet er  $325 - 330^\circ$  fra nord. En annen mulig løsning, men ikke like optimal er  $245 - 250^\circ$  fra nord.

Basert på forståelsen av geologisk historie, strukturegeologisk analyse og beregninger fra empirisk- og analytisk verktøy er det laget en modell i RockScience2. Fra analysen utført på denne modellen konkluderes det med at bergrom med en lengde på 35 m og høyde på 25 m og pilarer på med bredde 20 m og høyde 25 m er en god løsning. Med tanke på bergspenning og stabilitet er det en stor fordel å utforme bergrommet som en ellipsoide og orientere det tilnærmet parallelt med største hovedspenning. Ved å gjøre dette reduseres spenningskonsentrasjonen og strekkspenninger i både sidevegger og heng betraktelig. Det oppstår spenninger i sideveggen som kan være problematiske. Disse er anses å være lokalt og avhengig av formen på bergrommet og nødvendig bergsikring bør vurderes.

Det er gjort en 2D-analyse i denne avhandlingen, noe som betyr at ikke er utført stabilitetsvurderinger på bredden av bergrommet. Fra analytisk verktøy kommer det frem at utvinningsgraden ut i fra denne modellen ligger på  $42,9 - 61,9 \%$  der bredden på bergrommet varierer mellom 20 – 30 m.

---

## Abstract

The production of limestone from the mining of Akselberg was proposed to be extended to underground extraction by Brønnøy Kalk AS. In this context, it is desirable to find favourable orientation and dimensions of rock caverns and pillars for the underground outlet. Entry parameters for empirical, analytical and numerical tools are based on the project thesis, "Understanding Geological Processes and a Structural Geological Analysis in the Akselberg Area to Help Analyze the Local In Situ Stresses at Brønnøy Kalk AS in the Future Subsystem", written by the undersigned in the subject TGB4500 at Norwegian University of Science and Technology, NTNU autumn of 2019. Some minor corrections are made in this thesis. This thesis uses stress orientation, regime and other rock mechanical properties from Akselberg. Here the vertical stress is adjusted to 8 MPa, because the theoretically calculated and locally measured stresses differs from each other.

From the analysis of stability conditions, crack and weakness zones; it emerges that there are four crack sets, of which three predominate. The last one, the S4, is chosen to disregard, because it is of small magnitude. It is therefore chosen to look at the three crack sets, S1, S2 and S3. The analysis shows that the best orientation of the caverns is  $325 - 330^\circ$  from the north. Another possible solution, but not as optimal, is  $245 - 250^\circ$  from the north.

Based on the understanding of geological history, structural geological analysis and calculations from empirical and analytical tools, a numerical model was created in RockScience2. From analysis that were applied to this model, it concludes that a good solution is those with rock caverns that are in length of 35 m and a height of 25 m and pillars of a width of 20 m and a height of 25 m. In terms of rock stress and stability, it is a great advantage to design the rock caverns as an ellipsoid and orient it almost parallel to the highest main stress. By doing this, the stress concentration and tensile stress in both sidewalls and hinges were significantly reduced. Tensions arise in the sidewall which can be problematic. These are considered to be local and depend on the shape of the rock room and necessary rock support should be considered.

There is a 2D analysis in this dissertation, which means that no stability assessments have been carried out on the width of the rock caverns. From analytical tools it is possible to determine the degree of recovery based on this model, and estimated to be 42.9 - 61.9 % where the width is in the range between 20 - 30 m.



---

## Forord

Denne masteroppgaven er tilknyttet Instituttet for Geovitenskap og petroleum ved NTNU, og er skrevet for Brønnøy Kalk AS/Norsk Mineral i samarbeid med SINTEF. Avhandlingen har tittelen ”Vurdering av underjordsuttak ved Akeselberg” og er skrevet av Mayuran Vasantharajan våren 2020. Avhandlingen er en videreførelse av prosjektoppgaven ” Forståelse av geologiske prosesser og en strukturgeologisk analyse i Akselbergområdet til hjelp for analyse av de lokale målte bergspenninger ved Brønnøy Kalk AS sitt fremtidige underjordsanlegg”.

Jeg vil benytte muligheten for å takke hovedveileder, professor II ved NTNU, Eivind Grøv, for muligheten til å jobbe med denne oppgaven. Takk for at du har tatt deg tid til å stille opp på møter og svare på mail, der du har bidratt med mange gode innspill og ikke minst veiledning når jeg har stått fast. Jeg vil også benytte anledningen til å takke Nghia Qouc Trinh, førsteamanuensis II ved NTNU, for all opplæringen og hjelpen jeg har fått med RockScience2. Jeg setter meget stor pris på at du frivillig har tatt deg tid til å hjelpe meg.

Stor takk til Ingjerd Bunkholt og Trond Watne for å gi meg muligheten til jobbe med denne oppgaven. Takk for at dere har stilt opp på møter og gitt meg god litteratur på geologien i Velfjordområdet. Uten dere ville jeg hatt store problemer med å gjennomføre denne oppgaven.

Som helsepersonell har jeg vært nødt til å stille opp på jobb grunnet koronapandemien. Da pandemien var på sitt verste, var det koronasmitte på avdelingen jeg jobber på, og mangel på helsepersonell. Grunnet mye jobbing, ble jeg nødt til nedprioritere masteroppgaven i denne perioden. Jeg ønsker å takke instituttet for å gi meg utsettelse av oppgaven, slik at jeg kunne fullføre den senere.

Jeg ønsker også å rette en takk til Jeeviga Gunathasan for crashkurs i Adobe Illustrator. Uten deg hadde det ikke vært mulig med mange av figurene i denne oppgaven. Til slutt vil jeg takke min gode nabo Kari Nyhus og Luxman Srikanth for korrekturlesingen av oppgaven.

# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>IV</b>
<b>Forord</b>	<b>V</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstilling . . . . .	2
1.2 Metodikk . . . . .	3
1.2.1 Litteraturstudie . . . . .	3
1.2.2 Beregninger og bruken av ulike verktøy . . . . .	3
<b>2 Teori</b>	<b>5</b>
2.1 Bergmekaniske egenskaper . . . . .	5
2.1.1 Bergspenninger . . . . .	5
2.1.2 Elastisitetsmodul . . . . .	10
2.1.3 Deformasjon . . . . .	12
2.1.4 Brudd . . . . .	13
2.1.5 Poissons forholdstall . . . . .	14
2.1.6 GSI . . . . .	15
2.2 Bergrom . . . . .	16
2.2.1 Sprekkerose . . . . .	16
2.2.2 Designprinsipper av store bergrom . . . . .	17
2.3 Empirisk verktøy - Tangentielle spenninger . . . . .	19
2.4 Analytisk verktøy - Skattepliktigarel-metoden . . . . .	21
2.5 Numerisk verktøy . . . . .	27
<b>3 Geologi</b>	<b>28</b>
3.1 Geologisk historie . . . . .	28
3.1.1 Den kaledonske fjellkjeden . . . . .	28
3.1.2 De fire alloktonene . . . . .	33
3.1.3 Nedsliting av landskapet . . . . .	34
3.1.4 Alloktonenes transportretning . . . . .	34
3.2 Regionalgeologi . . . . .	36
3.2.1 Helgeland dekkekompleks . . . . .	36
3.2.2 Velfjordområdet . . . . .	37

3.2.3	Plutoner i Velfjordområdet . . . . .	40
3.2.4	Migmatitter i Velfjordområdet . . . . .	41
3.2.5	Nordlige Sauskarbonatene . . . . .	42
3.2.6	Hillstadvjellkarbonatene . . . . .	43
3.3	Lokalgeologi . . . . .	44
3.3.1	Akselbergområdet . . . . .	44
3.4	Strukturgeologisk analyse i Akselbergområdet . . . . .	46
3.4.1	Sausfjell plutonet . . . . .	46
3.4.2	Engadalen . . . . .	49
3.4.3	Nordlige Sauskarbonatene . . . . .	50
<b>4</b>	<b>Analyse av rådata</b>	<b>53</b>
4.1	Systematisering av rådata . . . . .	53
4.2	Rådata fra Engadalen, Forbergskog og Akselberg . . . . .	56
4.2.1	Engadalen . . . . .	57
4.2.2	Forbergskog . . . . .	59
4.2.3	Akselberg . . . . .	61
4.3	Bergspenningsanalyse . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Design av bergrom</b>	<b>71</b>
5.1	Analyse av stabilitetsforhold, sprekker og svakhetssoner . . . . .	71
5.1.1	Stabilitetsforhold . . . . .	71
5.1.2	Kartlegging av sprekker og svakhetssoner . . . . .	72
5.2	Skaleringen av bergmekaniske egenskaper . . . . .	77
5.2.1	GSI . . . . .	77
5.2.2	Elastisitetsmodul . . . . .	78
5.2.3	Trykk- og strekkfasthet . . . . .	78
5.3	Empirisk verktøy - Tangentielle spenninger . . . . .	81
5.3.1	Resultat . . . . .	81
5.3.2	Diskusjon . . . . .	82
5.4	Analytisk verktøy - Skattepliktigareal-metoden . . . . .	84
5.4.1	Pilarspenningen og utvinningsgraden . . . . .	84
5.4.2	Pilarstyrken . . . . .	85
5.4.3	Sikkerhetsfaktoren . . . . .	86
5.4.4	Diskusjon . . . . .	87

5.5	Numerisk verktøy . . . . .	88
5.5.1	Modellen . . . . .	89
5.5.2	Bergroms- og pilardesign - lengde og høyde . . . . .	91
5.5.3	Utforming og orientering . . . . .	94
5.5.4	Utvinningsgraden . . . . .	101
5.5.5	Diskusjon . . . . .	102
<b>6</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>104</b>
	<b>Referanser</b>	<b>107</b>
	<b>Tillegg</b>	<b>112</b>
<b>A</b>	<b>Teori</b>	<b>113</b>
A.1	Q-metoden . . . . .	113
A.2	Stereografisk projeksjon . . . . .	121
A.3	Strukturgeologi . . . . .	122
A.3.1	Antiform og synform . . . . .	122
A.3.2	Antiklinal og synklinal . . . . .	122
A.3.3	Hengselslinje og bøyelinje . . . . .	123
A.3.4	Foldningsvinkler . . . . .	123
A.3.5	Vergens . . . . .	124
<b>B</b>	<b>Geologi</b>	<b>125</b>
B.1	Den kaledonske fjellkjeden . . . . .	125
B.1.1	Forslag til ulike faser i Den kaledonske fjellkjededannelsen . . . . .	125
B.2	De resterende tre Alloktonene . . . . .	125
B.2.1	Nedre allokton . . . . .	125
B.2.2	Midtre allokton . . . . .	125
B.2.3	Øvre allokton . . . . .	126
B.3	Regionalgeologi . . . . .	127
B.3.1	Helgeland dekkekomplekset . . . . .	127
B.3.2	Velfjordområdet . . . . .	128
B.3.3	Sauskarbonatene . . . . .	130
<b>C</b>	<b>Analyse av rådata</b>	<b>131</b>
C.1	Grovsortering av rådata . . . . .	131

<b>D Bergrom</b>	<b>133</b>
D.1 Empiriske beregninger	133
D.1.1 $\sigma_v = 5$ MPa	133
D.1.2 $\sigma_v = 6$ MPa	134
D.1.3 $\sigma_v = 7$ MPa	136
D.1.4 $\sigma_v = 9$ MPa	137
D.1.5 $\sigma_v = 9,6$ MPa	138
D.1.6 $\sigma_v = 10$ MPa	140
D.1.7 $\sigma_v = 11,3$ MPa	142
D.2 Analytiske beregninger	144
D.2.1 Pilarspenningen og utvinningsgrad	144
D.3 Numerisk modellering	145
D.3.1 Vertikalprofil	145
D.3.2 Flere pilarer	148

## Figurer

1.1 1:60 000 kart over Akselbergområdet	1
1.2 Flyfoto av dagbruddet ved Akselberg	2
2.1 Topografisk betingede gravitasjonsspenninger	7
2.2 Retning og størrelse på horisonale spenninger i Norge	8
2.3 Elastisk- og plastisk deformasjon	12
2.4 Duktil- og sprø brudd	13
2.5 Poissons forholdstall	14
2.6 GSI	15
2.7 Sprekkrose	16
2.8 Bergspenning, orientering og dimensjonering av bergrom	18
2.9 Spenninger i heng og sidevegg	18
2.10 Tabell for estimering av A- og B-faktor	19
2.11 Pilarer og spenningfordeling	22
2.12 Bergspenningfordeling og influensavstand	23
2.13 Skattepliktigareal-metode	24
3.1 Illustrasjon av Tocanian-fasen	30
3.2 Dannelse av de fire Allohtonene	31

3.3	Kart over transportretningen til Alloktonene . . . . .	35
3.4	1: 1 750 000 kart over Helgeland dekkekomplekset . . . . .	36
3.5	1:375 000 kart over Velfjordområdet . . . . .	37
3.6	1:50 000 kart over nordlige Sauskarbonatene . . . . .	42
3.7	1:10 000 kart over Hillstadjellkarbonatene . . . . .	43
3.8	1:50 000 kart over Akselbergområdet . . . . .	44
3.9	Sausfjell plutonet . . . . .	47
3.10	Vertikall snitt av Sausfjell plutonet . . . . .	48
3.11	Vertikal snitt av Engaldalen . . . . .	50
3.12	Vertikalsnitt A-A' av Sauskarbonatene . . . . .	52
4.1	1:75 000 kart over gul- og grønn-liste . . . . .	54
4.2	Kart over målesteder i Akselberg og Forberg . . . . .	56
4.3	Engadalen: Stereoplott av hovedspenningene . . . . .	58
4.4	Forbergskog: Stereoplott av hovedspenningene . . . . .	60
4.5	Aksleberg: Stereoplott av hovedspenningene . . . . .	62
4.6	Platsisk - og sprø deformasjon . . . . .	64
4.7	Elastisitetsmodul og spenningsabsorpsjon . . . . .	66
4.8	Erosjon og residualspenning . . . . .	67
5.1	Stereoplot - poler - Dagbruddet på Akselberg . . . . .	74
5.2	Stereoplot - konturer - Dagbruddet på Akselberg . . . . .	75
5.3	Sprekkerose - Akselberg dagbrudd . . . . .	75
5.4	GSI-verdi for bergmassne i Akselberg . . . . .	77
5.5	Kalkstein - Inputparametere og estimering av in situ trykkfasthet . . . . .	79
5.6	Gneis - Inputparametere og estimering av in situ trykkfasthet . . . . .	80
5.7	Valg av bergromsform - Retning $\sigma_H$ . . . . .	82
5.8	Valg av bergromsform - Retning $\sigma_h$ . . . . .	82
5.9	Pilarspenningen, $\sigma_p$ . . . . .	84
5.10	Pilarspenningen og utvinngsgraden . . . . .	85
5.11	Pilarstyrken, $\sigma_p$ . . . . .	86
5.12	Sikkerhetsfaktor - 3Dplott . . . . .	86
5.13	Oversiktskart av vertikalprofiler på Akselberg . . . . .	89
5.14	Pilardimensjoner 20 m x 25 m - bergromsdimensjoner 35 m x 25 m, $\sigma_1$ -analyse . . . . .	92
5.15	Pilarspenning 20 m x 25 m - $\sigma_1$ -analyse . . . . .	93
5.16	Pilardimensjoner: 20 x 25 - Bergromsdimensjoner: 35 x 25, $\sigma_3$ -analyse . . . . .	94

5.17 Pilardimensjoner 20 m x 25 m - bergromsdimensjoner 35 m x 25 m, deformasjons-analyse . . . . .	94
5.18 Rektangulær bergrom - $\sigma_1$ -analyse . . . . .	95
5.19 Rektangulært bergrom - $\sigma_1$ -plott . . . . .	95
5.20 Rektangulært bergrom - $\sigma_3$ -analyse . . . . .	96
5.21 Rektangulært bergrom - deformasjons-analyse . . . . .	96
5.22 Ellipsoideformet bergrom - $\sigma_1$ -analyse . . . . .	97
5.23 Ellipsoideformet bergrom - $\sigma_1$ -plott . . . . .	97
5.24 Ellipsoideutformet bergrom - $\sigma_3$ -analyse . . . . .	98
5.25 Ellipsoideformet bergrom - deformasjons-analyse . . . . .	98
5.26 Ellipsoideformet bergrom orientert - $\sigma_1$ -analyse . . . . .	99
5.27 Ellipsoideformet bergrom orientert - $\sigma_1$ -plott . . . . .	99
5.28 Ellipsoideutformet bergrom orientert - $\sigma_3$ -analyse . . . . .	99
5.29 Ellipsoideformet bergrom orientering- deformasjons-analyse . . . . .	100
5.30 Utvinngsgraden og bergromsbredde . . . . .	101
A.1 RQD . . . . .	115
A.2 Tall for sprekkeseett . . . . .	116
A.3 Estimering av sprekkruhet . . . . .	117
A.4 Estimering av sprekkfylling . . . . .	118
A.5 Estimering av sprekkvannstallet . . . . .	119
A.6 Estimering av SRF . . . . .	120
A.7 Antiform og synform . . . . .	122
A.8 Anitklinal og synklinal . . . . .	122
A.9 Hengselslinje og bøyelinje . . . . .	123
A.10 Foldningsvinkler . . . . .	123
A.11 Vergens . . . . .	124
B.1 Kart over Helgeland dekkekomplekset . . . . .	127
B.2 Detaljert kart av Sauskarbonatene . . . . .	130
C.1 1:2 400 000 kart over rød- og oransje-liste . . . . .	131
D.1 Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 5$ MPa (Retning - $\sigma_H$ ) . . .	133
D.2 Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 5$ MPa (Retning - $\sigma_h$ ) . . .	134
D.3 Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 6$ MPa (Retning - $\sigma_H$ ) . . .	135
D.4 Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 6$ MPa (Retning - $\sigma_h$ ) . . .	135
D.5 Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 7$ MPa (Retning - $\sigma_H$ ) . . .	136

D.6	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 7$ MPa (Retning - $\sigma_h$ ) . . .	137
D.7	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 9$ MPa (Retning - $\sigma_H$ ) . . .	137
D.8	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 9$ MPa (Retning - $\sigma_h$ ) . . .	138
D.9	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 9,6$ MPa (Retning - $\sigma_H$ ) . . .	139
D.10	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 9,6$ MPa (Retning - $\sigma_h$ ) . . .	139
D.11	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 10$ MPa (Retning - $\sigma_H$ ) . . .	140
D.12	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 10$ MPa (Retning - $\sigma_h$ ) . . .	141
D.13	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 11,3$ MPa (Retning - $\sigma_H$ ) . . .	142
D.14	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 11,3$ MPa (Retning - $\sigma_h$ ) . . .	143
D.15	Pilarspenningen, $\sigma_p$ . . . . .	144
D.16	Pilarspenningen og utvinningsgraden . . . . .	144
D.17	Vertikalprofil: 823 200 . . . . .	145
D.18	Vertikalprofil: 823 400 . . . . .	145
D.19	Vertikalprofil: 823 600 . . . . .	146
D.20	Vertikalprofil: 823 800 . . . . .	146
D.21	Vertikalprofil: 824 000 . . . . .	146
D.22	Vertikalprofil: 824 100 . . . . .	147
D.23	Vertikalprofil: 824 200 . . . . .	147
D.24	Vertikalprofil: 824 370 . . . . .	147
D.25	Vertikalprofil: 824 480 . . . . .	148
D.26	Flere pilarer - $\sigma_1$ -analyse . . . . .	148
D.27	Flere pilarer - $\sigma_3$ -analyse . . . . .	148
D.28	Flere pilarer - deformasjonsanalyse . . . . .	149

## Tabeller

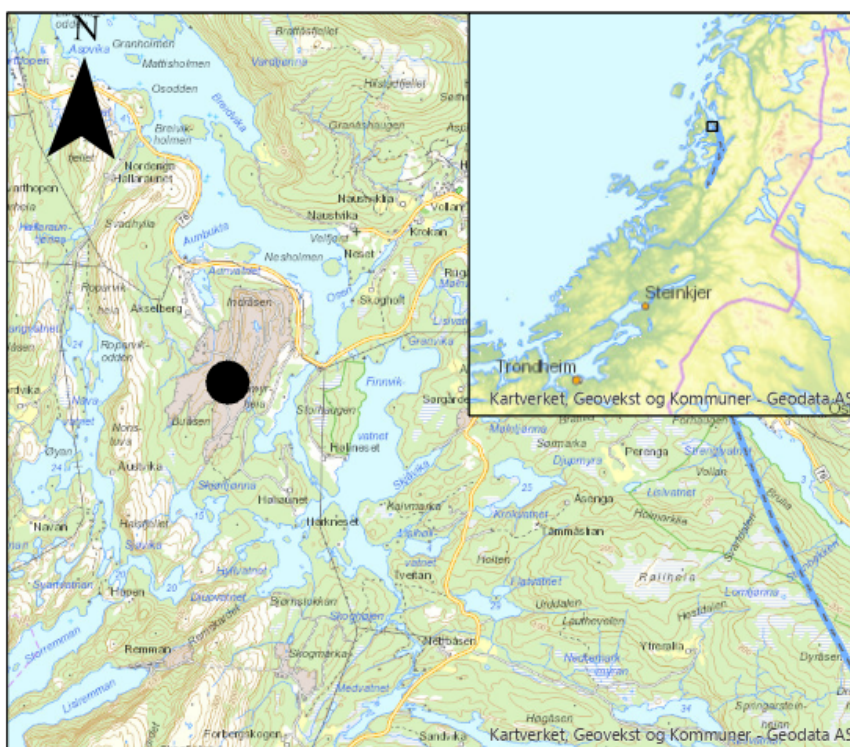
1	Gul-liste . . . . .	55
2	Grønn-liste . . . . .	55
3	Engdalen: Bergmekaniske egenskaper . . . . .	57
4	Engdalen: 3D-Spenningsmålinger . . . . .	58
5	Forbergskog: Bergmekaiske egenskaper . . . . .	59
6	Forbergskog: 3D-Spenningsmålinger . . . . .	60
7	Akseleberg: Bergmekaiske egenskaper . . . . .	61
8	Akselberg: 3D-Spenningsmålinger . . . . .	62



9	GSI-verdi - Akselberg . . . . .	78
10	Elastisitetmodul - Fra laboratorieverdier til In situ-verdier . . . . .	78
11	Kalkstein - Inputparametere og estimering av in situ trykkfasthet . . . . .	79
12	Gneis - Inputparametere og estimering av in situ trykkfasthet . . . . .	80
13	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 8$ MPa ( $\sigma_H$ ) . . . . .	81
14	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 8$ MPa ( $\sigma_h$ ) . . . . .	81
15	Inngangsparametere RockScience2 . . . . .	90
16	Inngangsparametere for bergspenning . . . . .	90
17	Numerisk modellering - dimensjonering av bergrom og pilarer . . . . .	92
18	Utrekning av sikkerhetsfaktoren . . . . .	93
19	Dimensjonering av bergrom og pilarer . . . . .	101
20	Faser i Den kaledonske fjellkjededannelsen . . . . .	125
21	Rød-liste . . . . .	132
22	Oransje-liste . . . . .	133
23	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 5$ MPa (Retning - $\sigma_H$ ) . .	133
24	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 5$ MPa (Retning - $\sigma_h$ ) . .	134
25	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 6$ MPa (Retning - $\sigma_H$ ) . .	134
26	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 6$ MPa (Retning - $\sigma_h$ ) . .	135
27	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 7$ MPa (Retning - $\sigma_H$ ) . .	136
28	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 7$ MPa (Retning - $\sigma_h$ ) . .	136
29	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 9$ MPa (Retning - $\sigma_H$ ) . .	137
30	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 9$ MPa (Retning - $\sigma_h$ ) . .	138
31	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 9,6$ MPa (Retning - $\sigma_H$ ) .	138
32	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 9,6$ MPa (Retning - $\sigma_h$ ) .	139
33	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 10$ MPa (Retning - $\sigma_H$ ) .	140
34	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 10$ MPa (Retning - $\sigma_h$ ) .	140
35	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 11,3$ MPa (Retning - $\sigma_H$ )	142
36	Empirisk metode - Utforming av bergrommet med $\sigma_v = 11,3$ MPa (Retning - $\sigma_h$ ) .	143

# 1 Introduksjon

Denne masteroppgaven er en fortsettelse av prosjektoppgaven ”Forståelse av geologiske prosesser og en strukturgeologisk analyse i Akselbergområdet til hjelp for analyse av de lokale målte bergspenninger ved Brønnøy Kalk AS sitt fremtidige underjordsanlegg” skrevet av undertegnede i faget TGB4500 ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU høsten 2019. Som tittelen tilsier, ble det i prosjektoppgaven gjort studier på geologisk historie og strukturgeologisk analyse både regionalt og lokalt ved Akselbergområdet. Det er ønskelig å benytte seg av kunnskap fra dette studiet til å analysere lokalmålte bergmekaniske egenskaper (bl.a. spenningsregimet og spenningsorienteringen) og annen rådata. Videre skal disse bergmekaniske egenskapene anvendes i masteroppgaven i empirisk-, analytisk- og numerisk verktøy for finne optimale løsninger med tanke på orientering og design av bergrom og pilarer.



*Figur 1.1: 1:60 000 kart over Akselbergområdet der den sorte prikken markerer dagbruddet i Akselberg. Kartet er laget i ArcGIS Pro.*

Akselberg befinner seg i Velfjorden, lengst sør i Nordland, omtrent 30 km sørøst for Brønnøysund. Akselberg er i dag et kalksteinsdagbrudd drevet av Brønnøy Kalk AS. Brønnøy Kalk AS er et heleid datterselskap av Norsk Mineral konsernet og har drevet med bergdrift på Akselberg siden 1988. Kalksteinen som blir produsert videreføres av Hustadmarmor AS i Elnesvågen til fyll-

stoff og betrykningsmiddel som blir brukt i papir. Produksjonen fra dagbruddet er estimert til å vare i 15 – 20 år, og det er ønskelig å utvide bergdriften til underjordsuttak. Brønnøy Kalk AS har i mange år utført studier for å se muligheten for en fremtidig underjordsuttak.



*Figur 1.2: Flyfoto av dagbruddet ved Akselberg. Bildet er tatt fra nord mot sør, der den røde stiplede firkanten indikerer hvor det fremtidige underjordsuttaket vil finne seg. Bildet er hentet fra Bunkholt, 2019.*

## 1.1 Problemstilling

I forbindelse med fremtidig kalksteinsuttak på Akselbergs underjordsuttak, er det gjennom de siste 20 årene gjort flere omganger med bergspenningsmålinger. Det er utført 3D-bergspenningsmålinger, så vel som hydraulisk jekking. Ved å sammenligne disse målingene fra andre regionale målinger, avviker målingene fra hverandre. Dette gjør at målingene er til dels vanskelige å tolke. I tillegg er det problematisk å bestemme de målingene en har størst tiltro til, og bestemme in situ-bergspenninger for Akselberg. Det skal på basis av forståelse av geologien, geologiske prosesser, både regionalt og lokalt, og strukturgeologiske analyser i området, forsøke å forstå, forklare, samt systematisere spenningssituasjonen som måles samt andre bergmekaniske egenskaper. Bergmekaniske egenskapene skal så anvendes i avhandlingen i empirisk-, analytisk- og numerisk verktøy for å finne optimale løsninger på orientering og design av bergrom og pilarer med tanke på stabilitet og utvinngingsgrad.

## 1.2 Metodikk

Denne masteroppgaven har vært todelt, der det i første omgang ble utført en litteraturstudie. Senere er det blitt brukt tid på tillæring og bruken av ulike verktøy for å finne optimale løsninger på orientering og design av bergrom og pilarer.

### 1.2.1 Litteraturstudie

Litteraturstudie kan utføres på mange forskjellige måter og ulike tilnærminger. Hovedformålet med denne oppgaven er å samle inn tilstrekkelig fakta og kunnskap om Akselbergområdet basert på kartlegging og forskning utført i dette området. Videre systematiseres denne kunnskapen til å finne frem relevant kunnskap i forhold til denne oppgaven og dens problemstilling. Dette er en omfattende oppgave, og en av begrensningene har vært mengden litteratur som finnes på Akselbergområdet. Mye av studien på geologisk historie og strukturgeologisk analyse ved Akselbergområdet er gjort i prosjektoppgaven, men det er blitt gjort noen korrigeringer under utførelsen av masteroppgaven.

På bakgrunn av kunnskap opphentet fra denne studien er det gjort analyse på bergmekaniske parametere. Resultatet fra denne analysen benyttes videre i empiriske-, analytiske- og numerisk verktøy for å bestemme optimale løsninger for orientering og design av bergrom og pilarer.

Fra litteraturstudien av stabilitetsforhold, sprekker og svakhetsoner i Akselberg, er det gjort analyse og bestemt gunstige orienteringer av bergrommet med hensyn til dette.

Det er også gjort litteraturstudie på empiriske-, analytiske og numerisk verktøy for å finne hvilke verktøy som er egnet for dette prosjektet.

### 1.2.2 Beregninger og bruken av ulike verktøy

Det ble brukt en rekke forskjellige beregningsmetoder og verktøy som GeoRose og RockScience2 for å kartlegge sprekker og svakhetssoner ved Akselberg. Disse ble presentert i sprekkerose og stereplott.

Det ble utført skalering av laboratoriemålte bergmekaniske parametere til in situ-verdier. Det ble brukt ulike verktøy i RockScience2 og teori fra litteraturstudien. Skaleringene ble senere brukt i

beregninger ved bruken av empiriske-, analytiske verktøy i Microsoft Excel. Der de mest relevante resultatene er presentert grafisk i koordinatsystemer laget i Microsoft Excel.

Mye tid ble brukt på å tillære seg bruken av RockScience2, som er et numerisk modelleringsverktøy, som er brukt i denne oppgaven. Undertegnede har aldri brukt noe lignende verktøy, og mye av tiden dette semesteret ble brukt for å tillære seg dette programmet. Grunnet koronapandemien ble hele tillæringen gjort på nett. Noe som har vært utforderende og begrensende til tider. Resultater fra empiriske- og analytiske beregninger ble brukt for å designe bergrommet og pilarene i RockScience2.

## 2 Teori

Dette kapitlet omhandler teori knyttet til en rekke forskjellige bergmekaniske egenskaper, bergrom, empirisk- analytisk- og numerisk verktøy. Teorien benyttes som for analyse av rådata, beregninger knyttet til empirisk – og analytisk- og numerisk verktøy. Det er gjort litteraturstudie på Q-metoden, stereografiskprojeksjon og strukturgeologi. Disse er lagt til som i Tillegg A.1, Tillegg A.2 og Tillegg A.3.

### 2.1 Bergmekaniske egenskaper

Spenningsorienteringen og spenningsregimet kan være to kritiske parametere ved utbygging av store bergrom som tunneler, gruver og fjellanlegg. Gunstig orientering av bergrommet i forhold til spenningssituasjonen kan gi store økonomiske fordeler og redusere bruken av bergsikring. Det er derfor viktig å foreta gode forundersøkelser, slik at det oppnås god kunnskap og forståelse av bergspenningen og andre bergmekaniske egenskaper før utbyggingen (Nilsen, 2016).

#### 2.1.1 Bergspenninger

Spenningsene rundt et bergrom er avhengig av in situ-spenninger som eksisterer i bergrommet og de spenningsene som blir induert etter utgravingen. Spenningsene orienteres tredimensjonalt, der det deles inn i 3 hovedspenninger. Hovedspenninger er normalspenninger på plan uten skjærspenninger, der trykkspenninger regnes som positive og strekkspenninger som negative (Nilsen, 2016). Hovedspenningene refereres som:

- Største hovedspenning =  $\sigma_1$
- Mellomste hovedspenning =  $\sigma_2$
- Minste hovedspenning =  $\sigma_3$

#### Vertikalspenning

I bergmassen vil det kunne opptre bergspenninger på grunn av gravitasjonskrefter innad i berget. Dette kommer fra det vertikale overdekket og materialets spesifikke vekt, altså egenvekt. Med dette kan den teoretiske vertikalspenningen beregnes (Nilsen, 2016).

$$\sigma_v = zg\rho \quad (1)$$

Her er:

$\sigma_v$  : Vertikalspenningen

$z$  : Overdekning/vertikale dybden

$g$  : Tyngdeakselerasjonen

$\rho$  : Densiteten til bergarten

### Horisontalspenning

I tillegg til vertikalspenninger eksisterer det også spenninger som virker på det horisontale planet. Like under overflaten kan horisontalspenningen bevege seg mer eller mindre fritt grunnet lave vertikalspenninger. Dette endrer seg lenger ned i grunnen. Her vil den laterale deformasjonen forhindre, og det oppstår horisontalspenninger,  $\sigma_H$  og  $\sigma_h$ . Ved å føle materialets elastisitetsteori og tverrkontraksjonskoeffisienten kan horisontalspenningen uttrykkes følgende (Nilsen, 2016):

$$\sigma_H = \sigma_h = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_v \quad (2)$$

Her er:

$\sigma_H$  : Største horisontalspenningen

$\sigma_h$  : Minste horisontalspenningen

$\nu$  : Poissons forholdstall

$\sigma_v$  : Vertikalspenningen

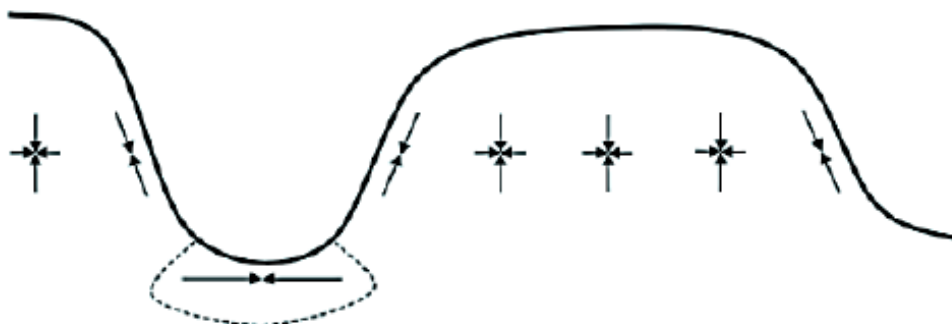
Denne formelen forteller sammenhengen mellom vertikalspenninger og Poissons forholdstall. Det kan virke som den horisontalspenningen alltid er mindre enn vertikalspenningen, men dette er ikke tilfelle. Fra ulike bergmålinger som er gjort rundt omkring i Norge, er det målt høyere horisontalspenninger, og av og til mye høyere horisontale spenninger i forhold til vertikalspenninger. Dette gjelder for målinger som er gjort på relativt mindre dyp. Det er også målt horisontalspenninger med ulike verdier, altså  $\sigma_h$  er ikke like stor som  $\sigma_H$  (Fejerskov mfl., 2000). Årsaken til dette kan være topografiske effekter og geologiske betingede bergspenninger.

## Bergspenninger i Norge

I Norge er det ulike områder som er preget av spesielt høye horisontalspenninger. Dette gjelder spesielt i Vestlandet, Trøndelag og Nord-Norge. Dette merkes ekstra godt i det prekambriske grunnfjellsområdet og langs Den kaledonske fjellkjeden (Hagen, 2018) og (Fejerskov mfl., 2000). Dette delkapittelet tar for seg ulike faktorer som påvirker spenningsregimet og spenningsorienteringen i Norge.

### Topografisk effekter

Topografiske effekter på bergspenningen kommer av at hovedspenningen orienteres parallelt og på tvers av dalsiden, dalsideeffekt. Fra tidligere målinger er det som oftest spenningsmålinger av hovedspenningen parallelt med dalsiden som utgir seg for å være den største hovedspenningen,  $\sigma_1$ , og målinger på tvers av dalsiden er som oftest den mellomste, altså  $\sigma_2$ . Dette gjør at vertikalspenningen som oftest er den minste,  $\sigma_3$  (Hagen, 2018). Dette er illustrert i Figur 2.1.



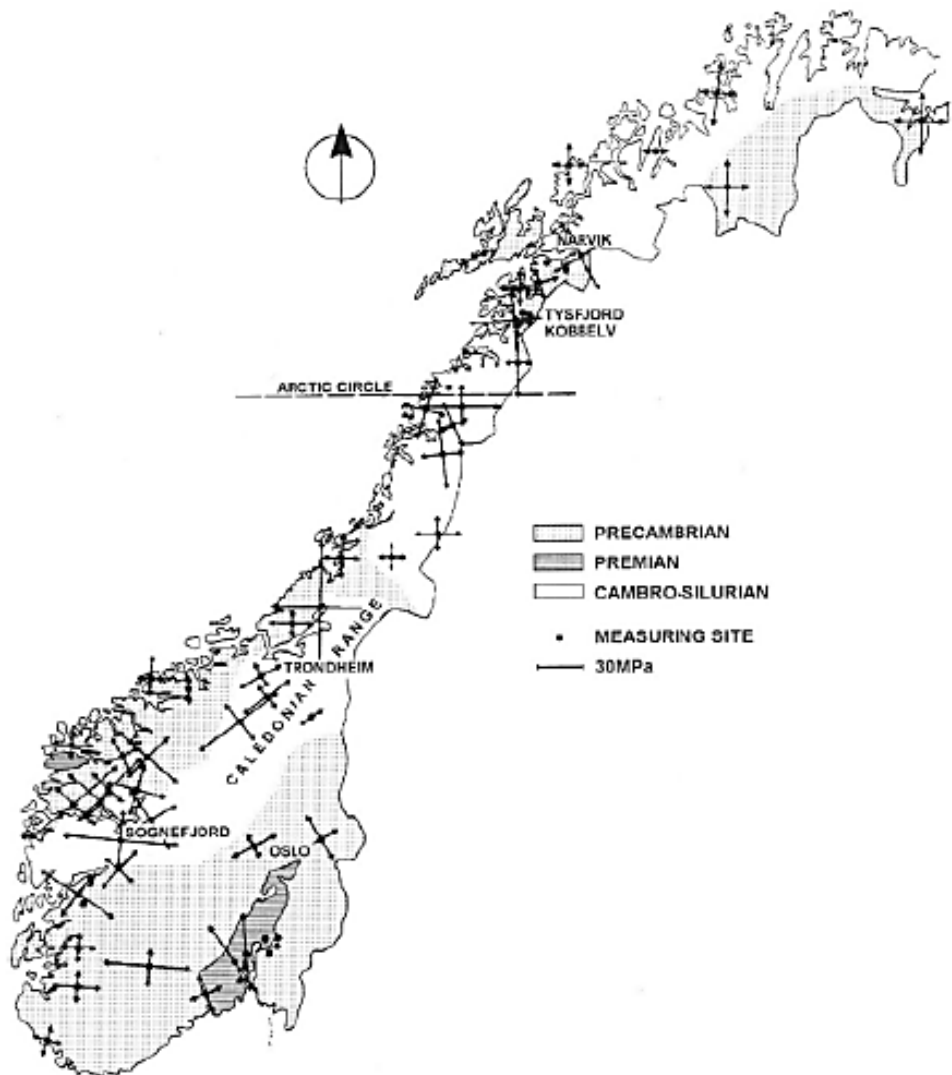
Figur 2.1: Topografisk betingede gravitasjonsspenninger, der hovedspenningene blir orientert parallelt og normalt på dalsiden. Figuren er hentet fra Myrvang, 2001

### Tektoniske spenninger

Av og til kan horisontalspenninger være unormalt høye eller lave. Tektoniske spenninger oppstår som følge av platetektonikk og kontinentaldrift. Ved midthavsryggene strømmer det magma fra jordas kjerne opp og ut til overflaten. Dette medfører til at kontinentene beveger seg fra hverandre. Dette induserer spenninger der to jordskorpeplater støter på hverandre. Det er som regel grunnfjellsbergartene som opplever de største spenningene. Dette kommer av at disse er mindre oppsprukket enn de kaledonske skyvedekkenene over, hvor spenningene da er utløst. Dette støtter teorien der spenningene er lagret i bergmassen fra Den kaledonske fjellkjededannelsen (Myrvang, 2001).



Den generelle retningen på hovedspenningene er dessverre ikke så lett å si, siden dette varierer veldig lokalt. En grov tommelfingerregel kan være at hovedspenningen er orientert parallelt eller normalt med Den kaledonske fjellkjeden (Fejerskov mfl., 2000).



Figur 2.2: Spenningsorienteringen og spenningsregimet ulike steder i Norge. Figuren er hentet fra Myrvang, 2001.

### **Residualspenninger**

Residualspenninger også kalt restspenning, kommer av at spenninger er låst fast inne i bergmaterialet. Disse spenningene kan komme fra belastning for eksempel fra massive isbreer som brått har blitt smeltet vekk. Dette kan ha en påvirkning på både horisontal- og ikke minst vertikalspenningen i området (Nilsen, 2016).

### **Strukturbetingede spenninger**

Strukturbetingede spenninger gjelder spenninger som oppstår grunnet inhomogenitet i bergmassene. Slike spenninger er typisk for bergmasser som er lagdelt, der lagene består av både svake og sterke bergmasser. Bergmassens stivhet vil variere mellom de forskjellige lagene. Dette kan føre til endring i både retning og størrelse på hovedspenningene. Dette gjelder selv for små strekninger (Nilsen, 2016). Når det kommer til svakhetssoner, kan disse sonene i svært liten grad overføre skjærspenninger. Dette vil medføre til at hovedspenningene blir orientert tilnærmet parallelt med svakhetssonen i området i nærheten av svakhetssonen (Nilsen, 2016).

Archiving-effekt er også et resultat av inhomogenitet i bergmassene. Fenomenet oppstår grunnet forskjell i stivhet. Bergmasser med relativt høyere stivhet har evnen til å motstå deformasjonen i større grad enn bergmasser med lavere stivhet. Dette gjør at bergmasser med relativt høyere stivhet absorberer noe av spenningen fra bergmassene med lavere stivhet. I dette tilfelle vil spenningsregimet innad i bergmassene endre seg grunnet denne stivhetsforskjellen (Wang mfl., 2014). Mer om stivhet i Avsnitt 2.1.2.

### 2.1.2 Elastisitetsmodul

Tunneldriving og utgraving av store bergrom er i Norge basert på forskjeller i stivhet, også kalt elastisitet mellom bergmassene og ikke minst sikringen. Bergmassene i Norge er av god kvalitet mange steder i landet. Ved å forstå og anvende kunnskapen om bergmassene på en riktig måte kan bergmassene i Norge benyttes som byggemateriale (Grøv, 2017). Dette medfører til bruken av sikringstiltak kan blir redusert betraktelig, som igjen bidrar til kostnadsreduksjon.

Elastisitet er i denne sammenheng evnen bergmassen har til å endre størrelse og form, altså deformeres under påvirkning av ytre krefter for så å gjenvinne sin opprinnelige form når disse kreftene avtar eller fjernes. Hooks lov sier at det eksisterer elastiske motkrefter som virker mot de ytre deformerende kreftene og kommer fra atomer og molekyler som skyves fra sin likevektsposisjon. Det eksisterer ulike tester som er standardisert av "International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering", ISRM kan benyttes for å finne elastisitetsmodulen til ulike bergprøver. Ved lave deformasjoner har Hookes lov god gyldighet og elastisitetsmodulen også kalt Youngs's modul definert som følgende (Nilsen, 2016) og (Myrvang, 2001);

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3)$$

E : Elastisitetsmodul (E-modul)

$\sigma$  : Spenning

$\epsilon$  : Tøyning

Størrelsen på bergprøvene vil ha en innvirkning på de målte elastisitetsmodulene. Større kjerneprøver som er tatt fra samme bergmasse vil som regel gi mindre elastisitetsmodul enn mindre kjerneprøver. Dette kommer av at større kjerneprøver kan inneholde flere sprekker og være mer forvitret enn mindre kjerneprøver. Dette kan bidra til å redusere både elastisitetsmodulen og trykkfastheten. Det kan derfor tenkes at deformasjonsegenskapene til store bergmasser vil være svært annerledes enn små bergprøver, dermed er det nødvendig å skalere ned laboratorieverdiene til elastisitetmodulen og andre bergmekaniske parametere (Myrland, 1972).

Det eksisterer ulike metoder for å skalere elastisitetsmodulen til bergprøver. Fra erfaring har mange av de tidligere metodene hatt en del svakheter (Hoek og S.Diederichs, 2006). Metodene ga dårlige estimater for prøver av massive sterke- og svake bergarter. På bakgrunn av dette er det foreslått en

metode for å skalere elastisitetsmodulen,  $E_{rm}$  til en bergprøve med kjent elastisitetsmodul,  $E_i$ .

$$E_{rm} = E_i \left( 0,02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{60+15D-GSI}{11}}} \right) \quad (4)$$

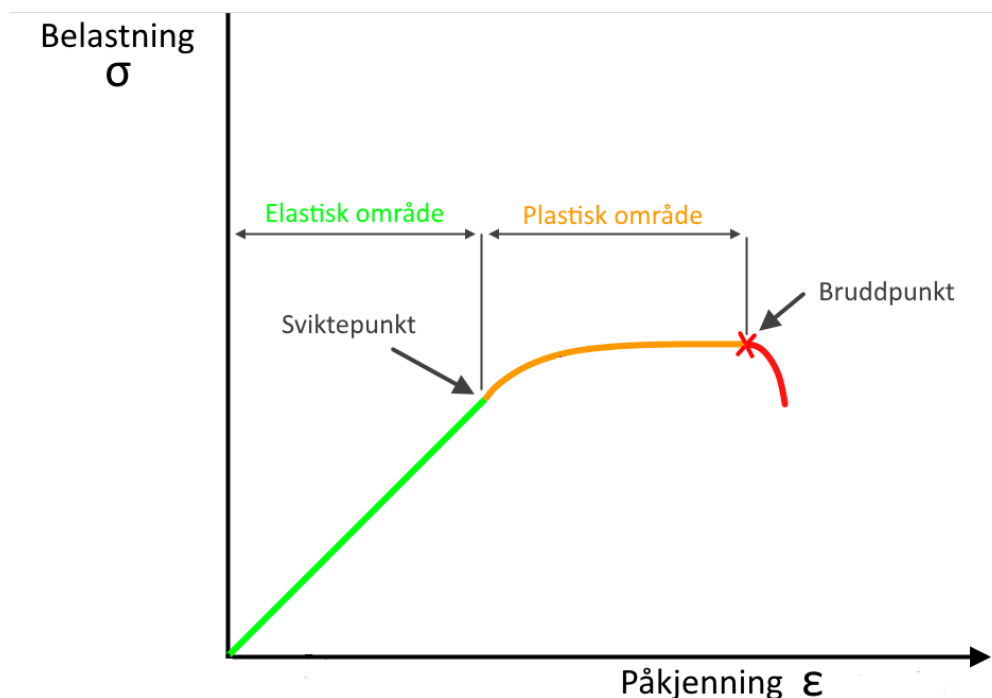
$E_{rm}$  : Estimert elastisitetsmodul

$E_i$  : Bergprøvens kjente elastisitetsmodul

D : Kontursprengningsgrad

GSI : Geological Strength Index

## 2.1.3 Deformasjon



Figur 2.3: Figuren viser belastning/spenning,  $\sigma$  langs y-aksen og tøyningen/påkjenning,  $\epsilon$  langs x-aksen. Grønne delen av grafen representerer det elastiske området, oransje delen det plastiske området og det røde bruddpunktet. Figuren er hentet fra Jansen, 2017 og modifisert i Illustrater.

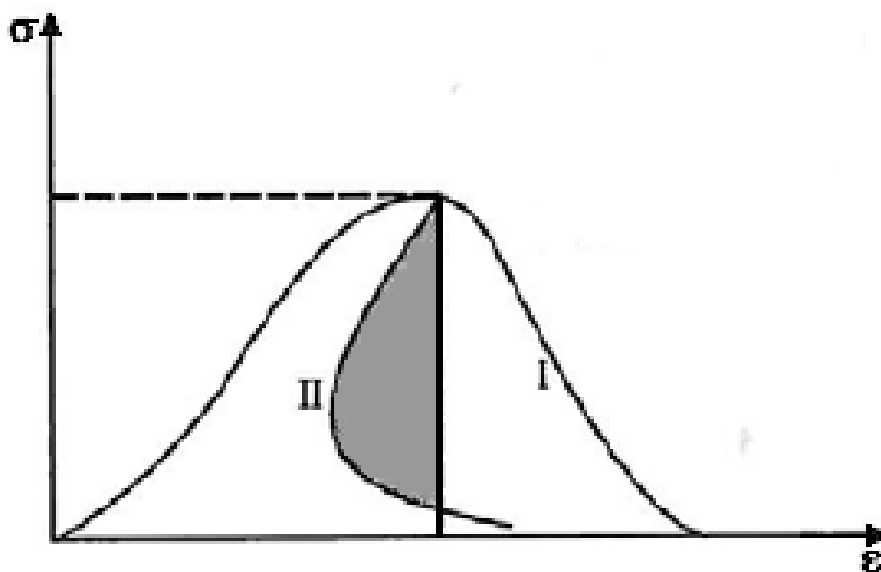
Deformasjon kan enten være elastisk, plastisk eller en kombinasjon av begge. Dette avhenger av stivheten, elastisitetsmodulen til bergmassen. Ved homogene bergmasser og relativt lave belastninger og påkjenninger vil materialet oppføre seg lineærelastisk. Her vil påkjenningen øke proporsjonal, tilnærmet lineært med belastningen. Forhold som anisotropi, inhomogenitet og diskontinuiteter gjør at de fleste bergarter ikke oppfører seg slik. Avviket som kommer av disse forholdene er som oftest lite og elastisitetsteorien kan brukes med god praksis (Myrvang, 2001). Når belastningen avtar eller fjernes vil bergmassen gå tilbake til sin opprinnelige form og den elastiske deformasjonen reverserer. Dette er illustrert som den grønne linjen i Figur 2.3.

Videre belastning der spenningen øker over flytegrensen, også kjent som elastisitetsgrensen, vil ikke bergmassen gå tilbake til sin opprinnelige form etter at kraften avtar eller opphører. Bergmassen går over til det plastiske området. Bergartene klarer å oppta last til en viss grad, men deformasjonen er varig. Spenningene er så store at det oppstår glidninger mellom atomplanene, men på molekylnivå henger de sammen. Dette er illustrert som den oransje linjen i Figur 2.3.

### 2.1.4 Brudd

Videre belastning fører til at bergmassen deformeres enda mer og til slutt går i brudd. Dette er illustrert som den røde linjen i Figur 2.3. Bergmassen vil gå i ulike typer brudd avhenging av elastisitetsmodulen som varierer fra bergart til bergart. E-modulen kan også variere innenfor samme bergart. Bergartene deles inn i to klasser, der disse er (Myrvang, 2001);

- Klasse I: Bergartene av denne klassen kalles seige eller duktile bergarter og går i stabilt brudd. Det som er felles for disse bergartene er at de har en elastisitetsmodul som er relativt lav og kan utholde tøyning uten å tape evnen til å oppta last. Eksempler på slike bergarter er marmor og kalkstein.
- Klasse II: Bergarter av denne klassen kalles sprø bergarter og går i ustabil brudd. Bergartene har relativt høyere elastisitetsmodul sammenlignet med duktile bergarter. Evnen til å oppta last avtar når tøyningen øker. Eksempler på slike bergarter er basalter og gneiser.



Figur 2.4: Figuren viser spenningen,  $\sigma$  langs y-aksen og tøyningen,  $\epsilon$  langs x-aksen. Klasse I til høyre og Klasse II til venstre. Det grå skraverte området representerer energien som kreves for å få kontroll på bruddet. Figuren er hentet fra Myrvang, 2001 og blitt modifisert i Illustrater.

### 2.1.5 Poissons forholdstall

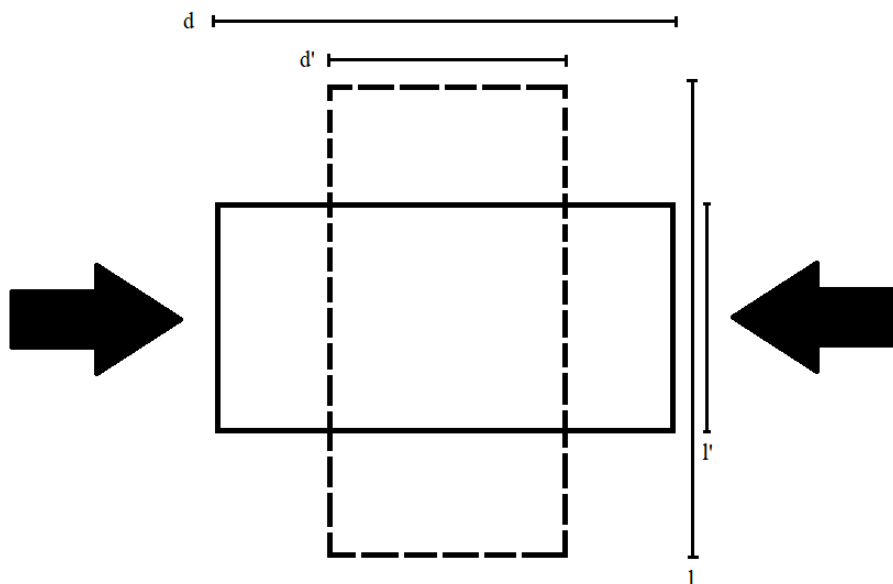
Poissons forholdstall som også går under navnet tverrkontraksjonskoeffisienten forteller om forholdet mellom relativ forkortelse i bredderetningen kontra den relative forlengelsen i lengderetningen ved påkjenning i bredderetning. Dette er definert som følgende:

$$\nu = -\frac{\epsilon_b}{\epsilon_l} \quad (5)$$

Her er:  $\nu$  : Poissons forholdstall

$\epsilon_b$  : Endring i bredderetning

$\epsilon_l$  : Endring i lengderetning



Figur 2.5: Rektangelen med de heldekkede linjene representerer materialet før det blir utsatt for spenning (de sorte pilene). Rektangelen med de striplete linjene er materialet etter det er blitt utstøtt for spenning. Bildet er laget i Paint.

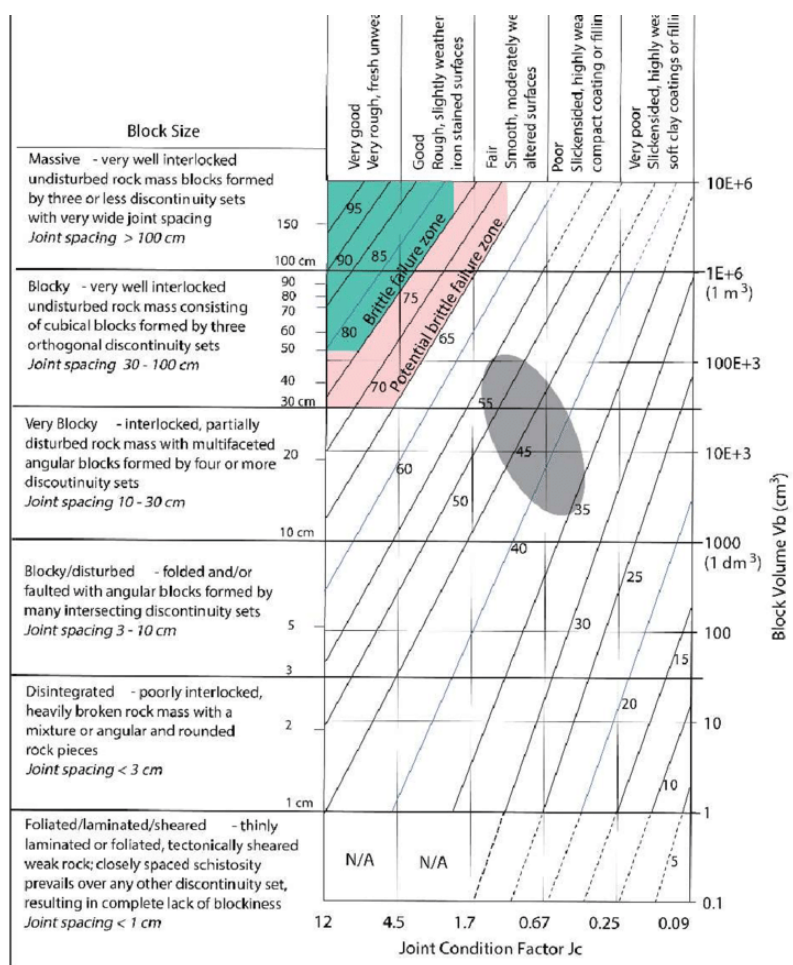
$$\epsilon_b = -\frac{d' - d}{d} \quad (6)$$

$$\epsilon_l = -\frac{l' - l}{l} \quad (7)$$

### 2.1.6 GSI

GSI som står for Geological Strength Index er et klassifiseringssystem som er utviklet for å kunne klassifisere bergmasser. Systemet er utviklet og brukes til å klassifisere bergmassens egenskaper for å dimensjonere nødvendig bergsikring. GSI benyttes også for å bestemme bergmekaniske egenskaper og pålitelige inngangsparametere for numeriske analyser (Marinos mfl., 2007).

Ved bruken av klassifiseringssystemet antas det at bergmassen består av tilstrekkelig antall sprekker som er tilfeldig orientert. Det vil si at bergmassen er homogen og isotropisk, noe som betyr at bergmassens egenskaper er uavhengig av retningen på spenningen som den blir tilført. For å kunne estimere bergmassens GSI brukes en tabell, se Figur 2.6. Her ønskes det å beskrive to av bergmassens egenskaper. Den første er overflaten til bergmassen. Her klassifiseres bergmassens overflate fra meget forvitret og svak berg til lite eller ikke noe forvitret og sterk berg. Den andre er antall sprekkesett og avstanden sprekke gjenntar seg. Disse to egenskapene til sammen utgjør et tall fra 1- 100, der 100 er bergmasse av god kvalitet til 1 som dårlig (Marinos mfl., 2007).



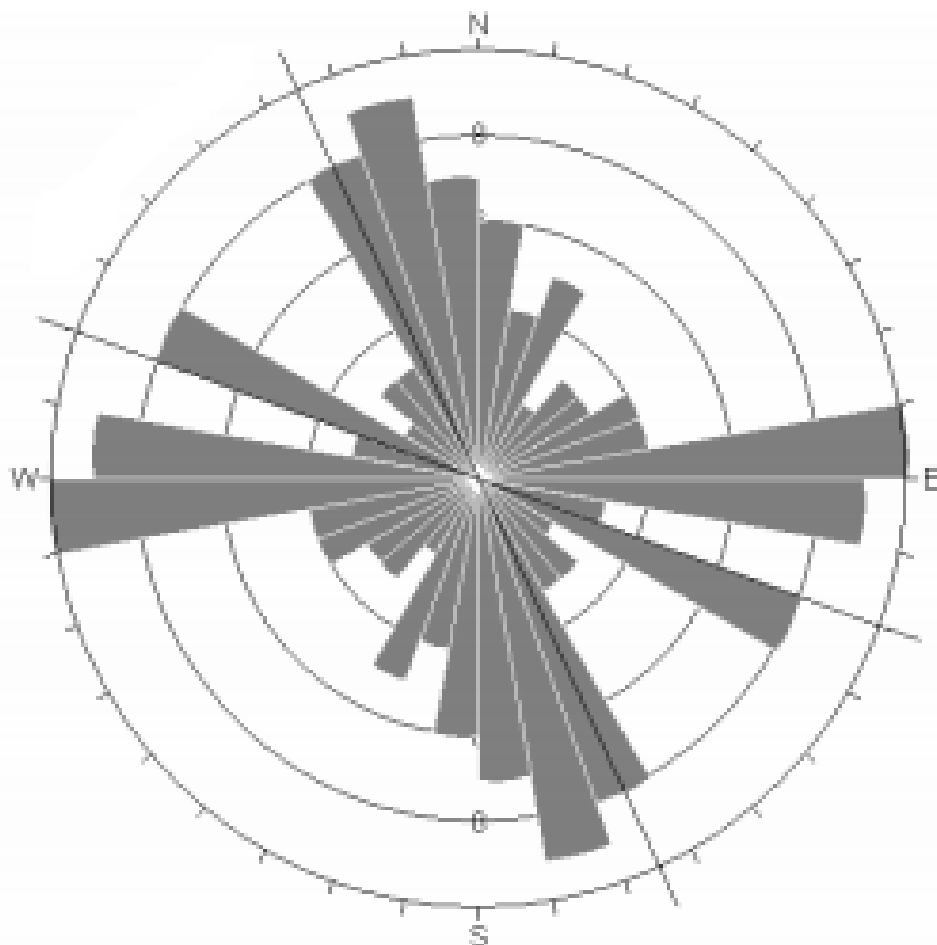
Figur 2.6: Tabellen viser hvordan estimere GSI til bergmasser ved å se på overflate egenskapene, antall sprekkesett og avstanden til disse gjenntar seg. Tabellen er hentet fra Das mfl., 2017



## 2.2 Bergrom

### 2.2.1 Sprekkerose

Sprekkerose er et verktøy som benyttes til å kartlegge strøk- og fallvinkler som forekommer i forskjellige sprekker, sprekkeseett og svakhetssoner. Sprekkerosens lengde viser hvor hyppig sprekkene forekommer i de forskjellige sprekkesettene og svakhetsonene, mens bredden forteller hvilke retningsområder strøket varierer (vegvesen, 2011).



*Figur 2.7: Dette er et eksempel på en sprekkerose. Lengden på gråsonene i rosen forteller om hvor hyppig sprekkene forekommer. Bredden forteller om hvilket retningsområde strøket varierer. Figuren er hentet fra vegvesen, 2010*

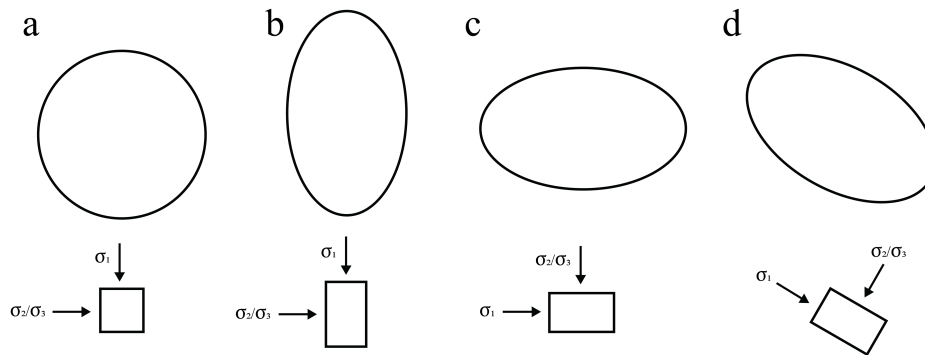
Sprekkerose kan benyttes til å finne den eller de mest gunstigste orienteringene av bergrom og tunneler i forhold til sprekker og svakhetssoner. Dette er i retningen der ingen sprekker forekommer. Det kan oppstå situasjoner der det er sprekker som er orientert i alle retninger. I en slik situasjon er den gunstigste orienteringen der hvor det er færrest sprekker (vegvesen, 2011).

### 2.2.2 Designprinsipper av store bergrom

Orienteringen, dimensjonering og utforming av det utgravede bergrommet ut i fra bergmassens bergmekaniske egenskaper, og tilføring eller reduisering av spenningskonsentrasjoner på ønskede områder, kan være med på å stabilisere berget og redusere driftskostnadene. Det er ønskelig å finne den beste kombinasjonen for den optimale utformingen som kan gi økt produksjon og samtidig redusere bergsikringskostnadene (Myrvang, 2001).

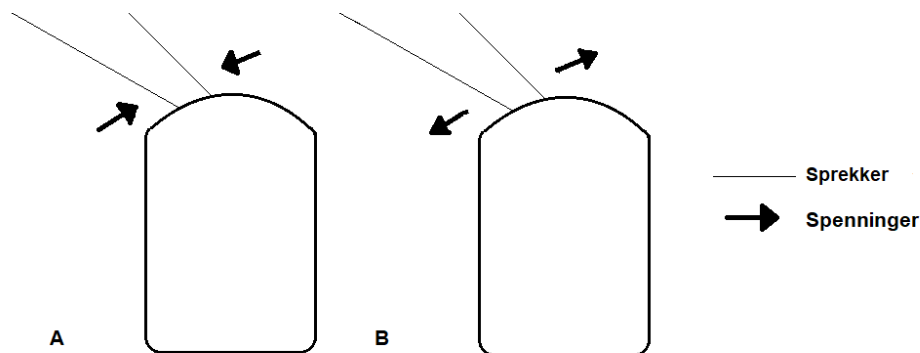
Utgraving av bergmasser fører til at spenningen som opprinnelig var absorbert av den utgravede massen blir redistribuert til den gjenværende bergmassen. Det oppstår spenningskonsentrasjoner, der konsentrasjonen er høyest langs åpningen og gjevnes ut innover i det gjenværende berget (Myrvang, 2001). I tillegg til dette oppnås det spenningskonsentrasjoner i alle spisse kanter og hjørner i bergrommet. Høye spenningskonsentrasjoner kan skape stabilitetsproblemer og er derfor uønskelig. Det er derfor gunstig å runde av hjørnene og tilstrebe buede linjer for å redusere spenningskonsentrasjonen i disse punktene. Dette gjelder spesielt ved svake bergarter og høye bergspenninger (Myrvang, 2001).

Generelt vil spenningskonsentrasjonen rundt heng (taket) og sideveggen by på større utfordringer med tanke på stabilitet ved større bergrom sammenlignet med mindre. Bergspenningen i et tilfeldig profil i en bergrom vil være avhengig av diameteren på bergrommet, men også størrelsesforholdet og retningen på hovedspenningene (Nilsen og Palmstrøm, 2000). Ved en isotrop spenningsituasjon, der  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$  (1/1 forhold), bør forholdet mellom spenn og høyde av det utgravede bergrommet være tilsvarende. I virkeligheten er in situ-spenninger som oftest anisotrope, der hovedspenningene varierer i de ulike retningene. I dette tilfellet bør bergrommet få en elliptisk eller rektangulær form der bredde- og spennforholdet er tilpasset forholdet mellom  $\sigma_1$  og  $\sigma_3$ . Ellipso- idens eller rektangelens lengste side bør orienteres parallelt med  $\sigma_1$ , mens den korte siden parallelt med  $\sigma_2$  eller  $\sigma_1$  (Hoek og Brown, 1980). Dette er illustrert i Figur 2.8.



Figur 2.8: Bergspenning, orientering og dimensjonering av bergrom. Figuren er hentet fra Hoek og Brown, 1980 og modifisert i Adobe Illustrator.

Etter utgravingen vil bergspenningen redistribueres i det gjenværende berget. Dette kan føre til høye spenninger i enkelte området av profilet som kan skape stabilitetsproblemer. Det kan også oppstå lave spenninger. Lave spenninger i heng og sideveggen vil skape problematikk spesielt der bergmassen er oppstrukket. Dette kan medføre til nedfall av blokker. I dette tilfelle er det ønskelig å øke spenningskonsentrasjonen slik at normalspenningen øker på sprekkflaten for å forhindre nedfall (Nilsen og Palmstrøm, 2000). Dette skaper en spenningsbue rundt profilet som hjelper med å stabilisere berget. Dette er illustrert i Figur 2.9.



Figur 2.9: Lave eller strekkspenninger kan skape problematikk der bergmassene er oppsprukket. I tilfelle B er dette illustrert. Her vil det være fare for nedfall av blokker. Det er derfor ønskelig og designe bergrommet slik at det forekommer positive spenninger i både heng og sideveggene. Dette for å skape en spenningsbue som stabiliserer berget. Dette er illustrert i A. Figuren er laget i Paint.

## 2.3 Empirisk verktøy - Tangentielle spenninger

På 80-tallet utviklet Brown og Hoek en metode for kunne estimere de tangentielle spenningene som forekommer rundt et bergrom. Dette er basert på geometrien til det utgravede bergrommet. Denne metoden er basert på en rekke antall detaljerte forsøk basert på BEM, grenselementmetoden (Nilsen og Palmstrøm, 2000). Det er brukt analytiske verktøy for å kunne komme frem til følgende sammenheng (Hoek og Brown, 1980);

$$\sigma_{\theta_r} = (A * k - 1)\sigma_v \quad (8)$$

$$\sigma_{\theta_w} = (B - 1)\sigma_v \quad (9)$$

Her er:










$\sigma_{\theta_r}$  : Tangentielle spenninger i hengen (roof)

$\sigma_{\theta_w}$  : Tangentielle spenninger i veggen (wall)

A og B = Ulike faktorer for heng og vegg avhengig av geometri vist i Figur 2.10

k = forhold mellom horisontal- og vertikalspenning

$\sigma_v$  : vertikalspenning

	Tunnel shape								
									
A	5.0	4.0	3.9	3.2	3.1	3.0	2.0	1.9	1.8
B	2.0	1.5	1.8	2.3	2.7	3.0	2.0	1.9	3.9

Figur 2.10: Estimering av A- og B-faktor ut i fra geometrien til bergrommet. Figureren er hentet fra Hoek og Brown, 1980 og modifisert i Adobe Illustrator.

Under bruken av denne metoden, antas at materialet er elastisk. Noe som betyr at det ikke er mulig å modellere brudd. Det benyttes derfor en styrkefaktor, som er materialets styrke dividert på spenningen i et bestemt punkt. Det vil derfor være en fordel å benytte numerisk modellering til

å sammenligne resultatene fra denne metoden.

Ved hjelp av enkle beregninger kan denne metoden benyttes til å vurdere tangentielle spenninger for bergrom. Videre kan disse spenningene sammenlignes med bergmassens styrkeparameter, trykkfasthet for å se om berget går i brudd. Ved tilfeller der spenningen overstiger trykkfastheten vil berget gå i brudd, og det vil oppstå bruddsoner. Som nevnt tidligere er det uønskelig med negative spenninger, strekkspenninger. Dette skyldes at bergmasser som er oppsprukket og har svært liten evne til å motstå strekkrefter. Dette medfører til redusert tangentielle spenninger på sprekkflatene, noe som kan skape problematikk knyttet til stabiliteten i bergrommet.

## 2.4 Analytisk verktøy - Skattepliktigarel-metoden

Det eksisterer mange forskjellige brytningsmetoder som benyttes ved pukk- og gruvedrift. Det ble utført studie av ulike metoder, disse er listet nedenfor;

1. Skivepallbrytning
2. Skiverasbrytning
3. Gjenfyllingsbrytning
4. Vertikal tilbake strossing
5. Longwall Mining
6. Rom og pilar

Grunnet ekstrakostnader knyttet til steinbrytingen under bakken må bergrommet som settes igjen ha en funksjon til etterbruk. Etterbruksformålet bestemmer hvilken brytningsmetode som er aktuelt for det gitte tilfelle. Brytningsteknikk, rom og pilarer kan være en god teknikk som benyttes i dette tilfellet.

### Pilarer

Ved utgraving av store bergrom, spesielt i gruveindustrien, er det nødvendig med flere parallelle bergrom eller haller. Mellom hallene dimensjoneres det pilarer, som er subhorisontale bergkropper som ikke blir utgravid. Disse fungerer som en frittstående støtte som bærer det overliggende berget. Pilarene settes i regelmessige mønster hvor det er ønskelig å dimensjonere minst mulige pilarer for å øke utvinningsgraden, men store nok til å stabilisere bergrommet. Spenningen som blir redistribuert i pilarene vil være kritiske for stabiliteten i bergrommet (Myrvang, 2001).

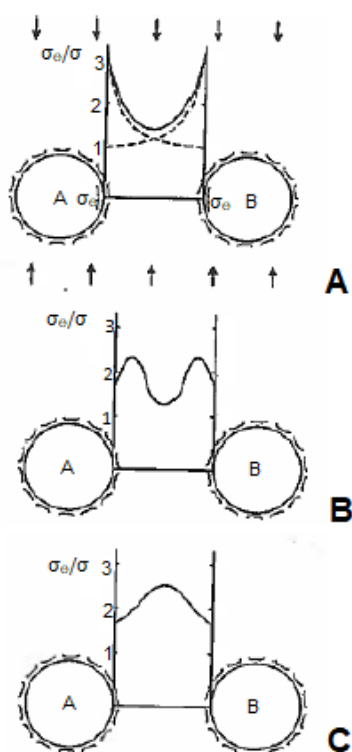
Figur 2.11 A viser bergspenningsfordelingen i en pilar med bergmekaniske egenskaper som tilsier et elastisk bergmateriale og to like store tunneler som er åpnet i et enaksielt spenningsfelt. Den stiplede linjen representerer spenningen som er induisert av en tunnel, mens den heltrukne linjen er spenningen induisert av begge tunnelene som er superposisjonert på hverandre. I dette tilfelle vil minste spenning være i midten av pilaren, men den største på veggene (Myrvang, 2001).

Grunnet overbelastning, sprengning eller kombinasjon av disse, vil berget i virkelighet være oppstrukket langs konturen av bergrommet. Dette gjør at berget ikke vil være i stand til å ta opp like

store spenninger og den kritiske bergspenningen flyttes innover i pilaren. Det oppstår da en ”kamelryggfordeling” og dette er illustrert i Figur 2.11 B.

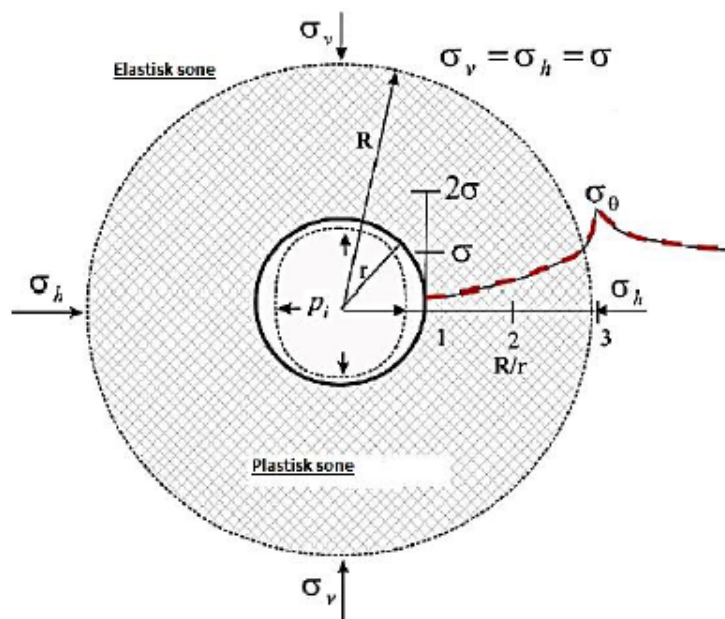
Den kritiske bergspenningstilstanden oppstår ved en ”dromedarryggfordeling”, som er når spenningsmaksimum opptrer i midten av pilaren. Dette er illustrert i Figur 2.11 C. I dette tilfellet er pilaren lastet til det den maksimum tåler og den er på grensen til å gå i brudd (Myrvang, 2001).

Fra enten overbelastning, riss fra sprengning eller en kombinasjon av disse vil føre til sprekkdannelse i berget. Dette gjør at berget deformeres plastisk og det oppstår mikrosprekker som gjør at berget ikke kan oppta like høye spenninger som den opprinnelig kunne. Grunnet dette flyttes den kritiske bergspenningen innover i bergmassen. Dette er ved faseovergangen mellom kamel- og dromedarfordeling. Dette gjør at berget får et større omslutningstrykk som bidrar til å styrke pilarens bæreevne (Myrvang, 2001).



Figur 2.11: A: A viser bergspenningsfordelingen i en pilar med bergmekaniske egenskaper som tilsier et elastisk bergmateriale og to like store tunneler som er åpnet i et enaksialt spenningsfelt. B: kamelfordeling. C: dromedarfordelingen. Figuren er hentet fra Myrvang, 2001

Figur 2.12 illustrerer hvordan bergspenningen flyttes innover slik at det oppnås et maksimum i den elastiske sonen, som senere vil avta grunnet influensavstanden til bergrommet. Dette er årsaken til at både kamel- og dromedarfordelingen oppstår. Under planleggingsfasen kan prinsippene med bergspenningsfordelingen i pilarene brukes til å optimalisere dimensjoneringen av bergrommet og pilarene. Dette kan bidra til å redusere bergsikringskostnadene og kanskje øke produksjonen (Myrvang, 2001).



Figur 2.12: Bergspenningsfordeling i elastisk- og plastisksone. Figuren er hentet fra Myrvang, 2001

### Skattepliktigareal-metoden

Skattepliktigareal-metoden går ut på å etterlate bergkropp som ikke blir utgravd, pilarer. Funksjonen til disse pilarene er å støtte taket etter utgravingen, der de tar opp spenninger fra berget som ligger rundt. Pilarene blir plassert systematisk i bergrommet. Spenningsforholdet til pilarene avhenger av en rekke forskjellige faktorer som størrelse, form og egenskapene til bergmassen. Denne metoden ser på forholdet mellom pilarens styrke i form av enaksiell trykkfasthet på berg som er intakt, pilarenes dimensjon og spenningene som oppstår i pilarene som følge av utgravingen og den overliggende massen (Li, 2018).

I planleggingsfasen er det ønskelig å dimensjonere pilarene og bergrommet. Det foretas forenklinger for å kunne benytte seg av denne metoden. Disse forenklingene er (Myrvang, 2001);

1. Det antas at hver pilar har et bestemt areal med en overdekning som er lik i hele området.



2. Rommet antas i dette tilfelle til å være uendelig i utstrekning i alle mulige retninger, slik at alle pilarene påføres den samme lasten.

Følgende formel benyttes til å beregne pilarspenningen,  $\sigma_p$  (Li, 2018);

$$\sigma_p = \frac{A_t}{A_p} \sigma_v = \frac{(W + B)(L + B)}{WL} \sigma_v \quad (10)$$

Her er følgende:

$\sigma_p$  : Pilarspenning

$\sigma_v$  : Vertikalspenning

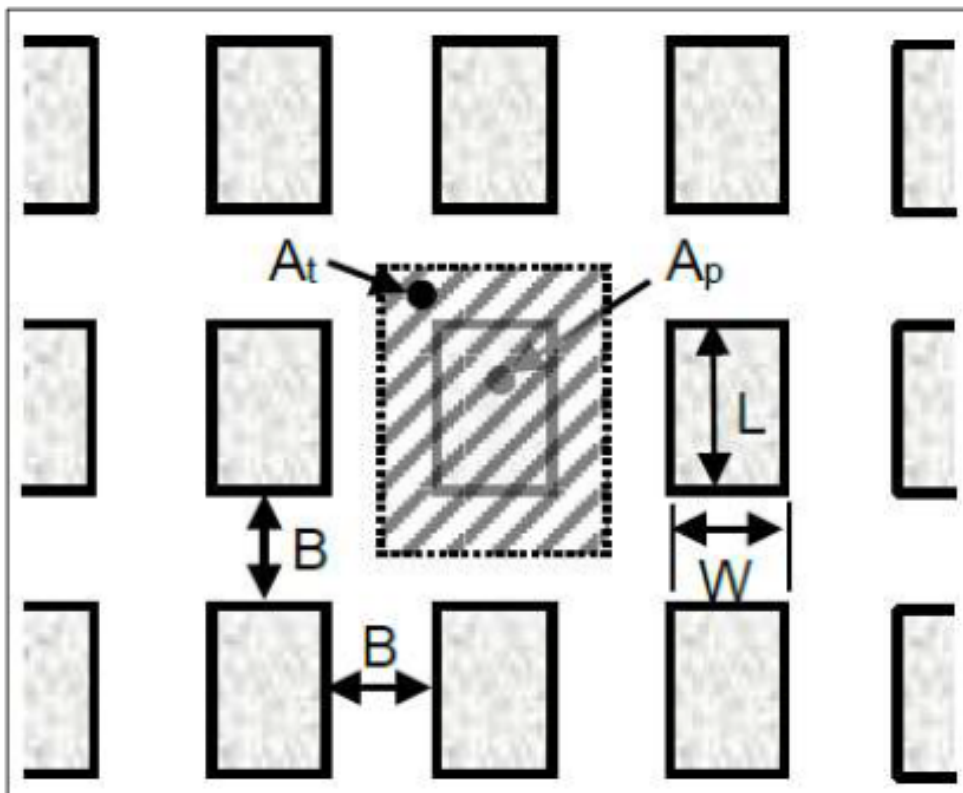
$A_t$  : Kryssjiktet til bergkolonnen

$A_p$  : Kryssjiktet til pilaren

W : Bredde av pilarene

L : Lengde av pilarene

B : Hulrom mellom pilarene



Figur 2.13:  $\sigma_p$  : Pilarspenningen ;  $\sigma_v$  : Vertikalspenning;  $A_t$  : Kryssjiktet til bergkolonnen;  $A_p$  : Kryssjiktet til pilaren;  $W$  : Bredde av pilaren;  $L$  : Lengde av pilaren;  $B$  : Hulrom mellom pilarene. Figuren er hentet fra Li, 2018.

Ved å benytte seg av denne metoden vil de geologiske faktorene, pilarspenning og vertikalspenning-

gen være den begrensede faktoren på hvor mye av bergrommet som kan utgraves. Det er ønskelig å bestemme bergmassens enaksielle trykkfasthet (Uniaxial Compressive Strength) og finne overdekningen som er gjeldene for det gitte området.

Utvinningsgraden vil være av stor betydning for lønnsomheten av produksjonen. Dette forholdet er avhengig av arealet av bergmassen som utgraves og det som blir satt igjen i form av pilarer. Utvinningsgraden ligger som regel på 60-75 %. I enkelte tilfeller der bergmassens egenskaper og overdekningen er gunstig, kan det oppnås en utvinningsgrad opp mot 85 %. Utvinningsgraden,  $R$ , kan bli estimert av følgende formel (Harraz, 2015);

$$R = 1 - \frac{A_p}{A_t} = 1 - \frac{1}{\frac{A_t}{A_p}} < 1 \quad (11)$$

Her er:

$R$  : Utvinningsgrad

$A_t$  : Kryssjiktet til bergkolonnen

$A_p$  : Kryssjiktet til pilaren

Pilarspenningen ses opp mot pilarstyrken. For å unngå brudd ønskes det at pilarstyrken er høyere enn pilarspenningen. Disse to til sammen kan benyttes til å estimere sikkerhetsfaktoren, SF for pilarene. I gruvedrift ønskes det at pilarer har en sikkerhetsfaktor på 1,5 - 2 (Li, 2018). I denne oppgaven tøyes grensene og det er ønskelig å designe pilarer og bergsom slik at sikkerhetsfaktoren ligger på ca 1,2. Følgende formeler benyttes til å estimere pilarstyrken,  $\sigma_{ps}$  og sikkerhetsfaktoren, SF (Li, 2018);

$$\sigma_{ps} = \sigma_c(0,778 + 0,222)\frac{w}{h} \quad (12)$$

Her er:

$\sigma_{ps}$  : Pilarstyrken

$\sigma_c$  : Bergmassens enaksielle trykkfasthet

w : Bredde av pilarene

h : Høyden av pilarene

$$SF = \frac{\sigma_{ps}}{\sigma_p} \quad (13)$$

Her er:

SF : Sikkerhetsfaktor

$\sigma_{ps}$  : Pilarstyrken

$\sigma_p$  : Pilarspenningen

Det er en rekke forskjellige svakheter knyttet til denne metoden. Dette kommer spesielt frem i den enaksielle trykkfastheten til bergarten. Enaksielle trykkstyrken kommer som regel fra laboratorietester. Testene utføres som regel på intakte små bergprøver som ikke kildrer bergmassens in-situ egenskaper. I virkeligheten vil bergmassen bestå av sprekker og andre inhomogeniteter. Som oftest vil trykkstyrken avta desto større bergprøven er, og det er derfor viktig å skalere trykkstyrken til in-situ (Myrvang, 2001).

Fra erfaring viser det seg at spenningskonsentrasjonen er høyest i hjørner og kanter nær tunnelveggen og taket. I denne metoden antas pilarspenningen å være jevnt fordelt over hele pilaren. Det antas også at det kun vil være enaksial vertikalt spenningsfelt som innvirker pilarene (Myrvang, 2001). Omslutningstrykket fra horisontalspenningen vil bidra til å styrke bergmassen. Dette betyr at pilarstyrken som benyttes ved denne metoden vil være lavere enn det den vil være i felt (Li, 2018).

Det tas heller ikke hensyn til plasseringen til de forskjellige pilarene i bergrommet. Pilarene vil bli belastet forskjellig avhengig av hvor de befinner seg i bergrommet. Pilarer som befinner seg på kantene belastes mindre enn de i midten. Dette betyr at desto mindre bergrom som utvinnes, jo mer konservativ er metoden. På tross av disse svakhetene har det vist seg at metoden har fungert godt for veiledende pilardimensjoner (Myrvang, 2001).

## 2.5 Numerisk verktøy

Numerisk modellering er et verktøy som benyttes av ingeniørgeologer verden rundt. Dette er i dag et viktig verktøy som kan benyttes ved blant annet dimensjonering og planlegging av gruvedrift. Utviklingen av avansert utstyr og veksten av digitalisering gjør det mulig å utføre mer komplekse analyser av både bergspenninger og deformasjoner i bergmassen (Trinh mfl., 2016). Numerisk modellering kan benyttes som et sikkerhetsverktøy der det kan kontrollere og sammenligne empiriske og analytiske metoder. Fordelen med numerisk modellering er at denne metoden kan benyttes ved tilfeller der geologiske forhold er kompliserte og det er store bergrensinger og store avvik knyttet til analytiske- og empiriske metoder for det gitte området. En vesentlig årsak til at slik verktøy stadig blir mer og mer viktigere er at det ikke bare åpner opp muligheten for prosjektering, men slike verktøy kan benyttes for å håndtere utfordringer uten å hente erfaring fra lignende prosjekter (Trinh mfl., 2016).

Numerisk modellering er et meget hjelpsomt verktøy en kan benytte, men det er viktig å stille seg kritisk ved bruk av slike verktøy. Kvaliteten til modelleringen er basert på geologiske tolkninger og inputparametere fra forundersøkelser. Resultatet av modellen er avhengig av dette. Det er en rekke utfordringer knyttet til slike modeller. Det kan skjule uventede problemer som har blitt oversett under modelleringen. Dette kan komme av feilaktig valg av input-parametere og feiltolkninger. Ved å overse dette kan det få store konsekvenser under- og etter utgravingen av bergrommet (Trinh mfl., 2016).

I denne oppgaven benyttes det RockScience2, tidligere kjent ved Phase2 til modelleringen av bergrommet og pilarene.

## 3 Geologi

Første delen av dette kapittelet tar for seg ulike geologiske prosesser fra Norges geologiske historie. På land deles berggrunnen i Norge inn i fem forskjellige geologiske hoveddeler (Ramberg mfl., 2006):

1. Prekambriske grunnfjell
2. Den kaledonske fjellkjeden
3. Devonske bergarter
4. Oslofeltet
5. Jura-krittbergarter (kun et lite felt)

Store deler av geologien i Akselbergområdet er preget av Den kaledonske fjellkjededannelsen. Videre i denne oppgaven velges det derfor å sette fokus på dette og se bort fra de andre geologiske hoveddelene som er av lite interesse. Senere bygges det en regional- (Velfjordområdet) og lokal-geologisk (Akselbergområdet) forståelse. Til slutt er det utført lokal strukturgeologisk analyse som skal brukes til systematisering av rådata og analyse av de lokale målte bergspenningene, Avsnitt 4, ved Brønnøy Kalk AS sitt fremtidige underjordsuttak.

### 3.1 Geologisk historie

#### 3.1.1 Den kaledonske fjellkjeden

Den kaledonske fjellkjeden, også kjent som Kaledonidene, er en betegnelse på en fjellkjede som ble dannet i tidlig-fanerozoikum. I sør strekker fjellkjeden seg fra vestlige deler av Europa gjennom Irland og Skottland, og i nord strekker den så langt som til Svalbard, gjennom Norge og en liten del av Sverige (Roberts, 2003). Motstykket til denne fjellkjeden ligger i et belte langs østkysten av Nord-Amerika og deler av Grønland, og kalles Den appalachiske fjellkjeden (Ramberg mfl., 2006).

Det hele begynte i sen-prekambrium, omtrent 610Ma, der oppsprekking og deling av superkontinentet Rodinia fant sted (Weil mfl., 1997), (Svenningsen, 2001) og (Bingen mfl., 1998). Resultatet av oppsprekkingen førte til Rodinia ble delt i mindre subkontinenter som Laurentia, Baltika og en rekke andre. I denne oppgaven fokuseres det på subkontinentene Laurentia, som består av dagens Nord-Amerika, og Baltika, som består av dagens Europa.

Subkontinentene Laurentia og Baltika startet å gli fra hverandre og dannet et havområde, Iapetushavet. En gang i løpet av overgangen fra kambrium til ordovicium ble bevegelsen reversert. Dette førte til platekonvergens der begge subkontinentene begynte å gli mot hverandre (Rehnström mfl., 2002), (Mckerrow mfl., 2000) og (Roberts, 2003). Årsaken til dette er ukjent. Platekonvergens førte til lukking av Iapetushavet og til slutt en enorm kontinentalkollisjon mellom Laurentia og Baltika. Dette medførte til dannelsen av Den kaledonske fjellkjeden. Senere, i midt-devon og perioden etter var subkontinentene utsatt for kraftig ekstensjonsdeformasjon ved kontinentalgrensen. Årsaken til dette er subkontinentene begynte å gli fra hverandre og dette var starten på slutten av Den kaledonske fjellkjeden (Ramberg mfl., 2006) og (Roberts, 2003). Alle disse geologiske hendelsene utgjør til sammen Den kaledonske fjellkjedefoldningen, og varte i en periode på omtrent 200 millioner år.

Det eksisterer en rekke forskjellige forslag til inndeling av ulike tektoniske faser av Den kaledonske fjellkjedefoldningen. Disse er listet i Tabell 20 i Tillegg B.1. Videre i denne oppgaven settes det fokus på Den skandinaviske kalodoniden som først var delt i fire forskjellige faser (Roberts, 2003), der den ene fasen, Finnmark-fasen ble motbevist (Krill og Zwaan, 1988), (Slagstad, 2006), og (Roberts, 2007). Det er derfor valgt å se bort fra denne fasen i denne oppgaven. Den skandinaviske kalodoniden deles inn i tre faser:

1. Trondheim-fasen
2. Tocanian-fasen
3. Scandian-fasen

### **Trondheim-fasen**

Trondheim-fasen skjedde i perioden 500 - 475Ma (midt-kambrium til tidlig-ordovicium). Subkontinentene Laurentia og Baltika begynte å skli mot hverandre. Dette var starten på lukkingen av Iapetushavet og begynnelsen på dannelsen av Den kaledonske fjellkjeden. Denne fasen er hovedsaklig preget av kompresjonsdeformasjon av grunnfjellet og metamorfose, og fragmentering og dannelser av ofiolittkomplekser (Roberts, 2003).

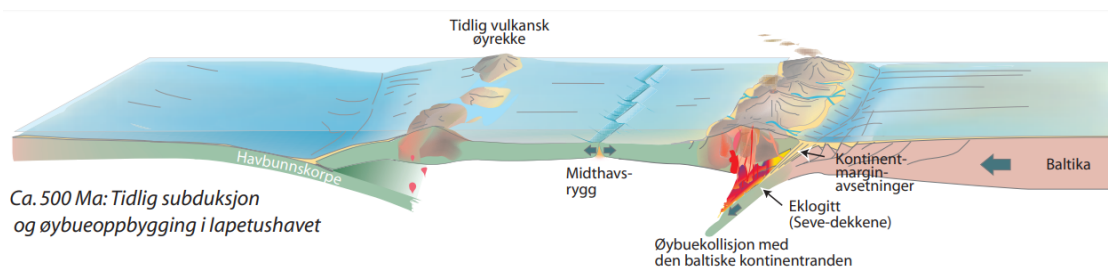
Langs store deler av norskekysten, fra Lyngen i nord og hele veien ned til Karmøy i sør, finnes det ofiolittiske bergarter (Roberts, 2003). Ofiolittkompleks eller ofiolittiske bergarter er en fellesbetegnelse på en gruppe mafiske og ultramafiske bergarter som er antatt å ha sin opprinnelse under eller på havbunnen. I dette tilfelle fra Iapetushavet mellom Baltika og Laurentia. Havbunnen

har blitt forskjøvet opp på grunnfjellet under dannelsen av Den kaledonske fjellkjeden (Roberts, 2003).

### Tocanian-fasen

Tocanian-fasen fant sted mellom 475 - 445Ma (tiddlig- til sen-ordovicium). I denne perioden ble det dannet subduksjonssoner langs kontinentalmarginen av Laurentia. Her ble det utviklet et system av øybuer som i begynnelsen var umodne, dominert av submarin vulkanisme, og som senere utviklet seg til modne øybuer med eksplosiv vulkanisme og enorme vulkanske øyer (Ramberg mfl., 2006).

Ved konvergente platebevegelser vil to eller flere jordskorpeplater kollidere. Platene presses først sammen, der en av platene, avhengig av tetthet, vil gå under den andre. Den tyngste og som oftest den eldste, vil bli presset ned. En slik innsynkningsone kalles subduksjonssone. På grensen der en havbunnsplate møter en annen havbunnsplate, dannes det et system av vulkanske øybuer, mens der det oppstår en kollisjon mellom havbunnsplate og kontinentalplate dannes det et system av kontinentalbue. Prosessen i begge tilfeller er i grove trekk det samme. Magmaen som dannes ved kontinentalbuesystemene er mer komplekse enn fra øybuesystemene, noe som skyldes kontinentalplaten (NGU, 2015).



*Figur 3.1: Illustrasjon på mulig utvikling av Den kaledonske fjellkjeden i Tocanian-fasen. Platekonvergens fører til et øybuesystem der havplatene møtes på den laurentiske siden. På baltiske siden dannes det et system av kontinentalbuer der kontinental- og havbunnsplaten kolliderer. I tillegg til dette dannes det ofiolittkomplekser på overflaten og eklogittbergarter i dypet. Figuren er hentet fra Ramberg mfl., 2006*

På den baltiske siden dannes det ofiolittkomplekser og øybuesystemer. På den laurentiske siden blir havbunnsplaten subduisert under et mikrokontinent som befant seg i Iapetushavet. Her ble det utviklet et kontinentalbuesystem langs den kontinentale grensen (Roberts, 2003). Dette førte til en rekke hendelser, blant annet intrusjon av enorme plutoniske (størkningskropp) komplekser. Det

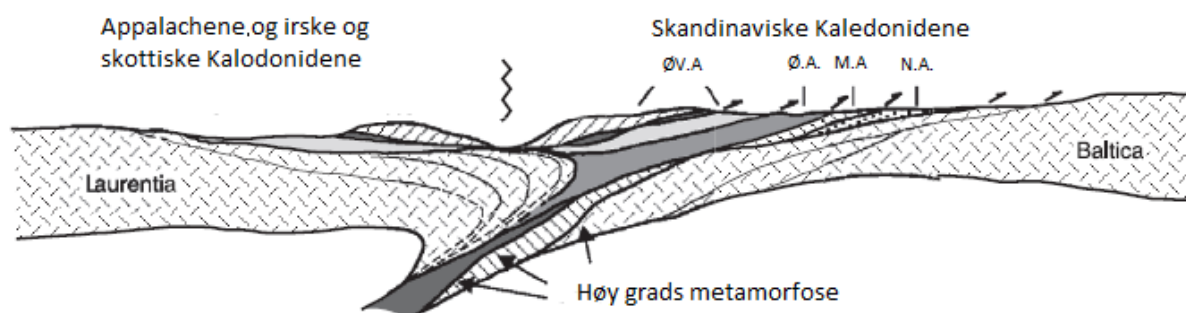
er fra denne fasen de tre største batolittbeltene i Norge stammer fra; Sunnhordlandsbatolitten på Vestlandet, Bindalsbatolitten ved Helgelandskysten og Smøla-Hitrabatolitten i Midt-Norge (Ramberg mfl., 2006).

I tillegg til obduksjon av ofiolittkomplekser, ble det også dannet eklogittbergarter. Dette tyder på at bergartene har blitt fraktet ned til store dyp i jordskorpen (Griffin mfl., 1985), (Roberts, 2003) og (Ramberg mfl., 2006).

### Scandian-fasen

Scandian-fasen fant sted fra 420 - 400Ma (tidlig-devon). Tidlig i denne fasen omhandler selve kollisjonen mellom Laurentia og Baltica, mens senere omhandler divergente platebevegelser der Laurentina og Baltica startet å bevege seg fra hverandre.

Laurentia var lettere og mulig yngre enn Baltica, dermed resulterte denne kollisjonen med subduksjon av Baltica under Laurentia ved kontinentalmarginen. Dette er opphavet til de fire Alloktionene. Disse er beskrevet i Avsnitt 3.1.2 og Tillegg B.2. Metamorfose helt ned til eklogittfacies er en antydning på at subduksjonen av Baltica nådde store dybder (Roberts, 2003). Det er også oppdaget koesitt og mikrodiamanter, som indikierer dybder ned til 100 km (Ramberg mfl., 2006).



Figur 3.2: Resultatet av kontinentalkollisjonen blir dannelse av de fire alloktionene; Øverste alloktion (Ø.V.A.), Øvre alloktion (Ø.A.), Midtre alloktion (M.A.) og Nedre alloktion (N.A.). Det blir også dannet høygrads metamorfiserte bergarter grunnet subduksjon av det baltiske grunnfjellet (Roberts, 2003). Figuren er hentet fra Ramberg mfl., 2006.

Som følge av kollisjonen ble det landheving. I samme periode førte elve- og bekkerosjon til nedtæring av ofiolittene og dannelser av sedimentære bassenger.

Kollisjonen kunne ikke vare evig, og slutten av Scandian-fasen, midt-devon og perioden etter var



i hovedsak preget av ekstensjonsdeformasjon. Fjellkjeden skled tilbake, og dette var slutten på Den kaledonske fjellkjeden, der det hele endte med at fjellkjeden til slutt kollapset (Thorsnes og Løseth, 1991) og (Andersen, 1998) som er referert i (Sandøy, 2003).

### **Sulindianhendelsen**

Sulidanhendelsen betegnes ikke som en egen fase i Den kaledonske fjellkjededannelsen, men en hendelse som har viktig betydning for dagens spenningsorientering mange steder i landet (Fossen og Dunlap, 1998). Under den tidlige fasen av divergente platevegelsen (Fossen, 2019), var det ekstensjonsdeformasjon på en rekke steder, samtidig som konvergens helt ned til nedre jord-skorpeplatenivåer. Dette er observert på overflaten i forlandsbassenget som er utviklet bak kollisjonssonen på den baltiske siden (Fossen og Dallmeyer, 1998) og (Fossen og Dunlap, 1998) som er referert i (Sandøy, 2003). Videre resulterte dette med sprø reaktivering av nordøst (NØ) til østvest (ØV) foldning, noe som er sinistral transtensjonsdeformasjon ((Krabbendam og Dewey, 1998) referert av (Tøgersen, 2011)).

### 3.1.2 De fire alloktonene

Resultatet av kontinentkollisjonen ble subduksjon av Baltika og mulig et eller flere mikrokontinenter som kan ha eksistert mellom disse subkontinentene, under Laurentia. Det ble det dannet skyvedekker, der bergartsenheter som ble revet løs fra både Baltika og Laurentia, ble transportert og plassert oppå det baltiske grunnfjellet (Roberts, 2003).

Den skandinaviske kaledoniden er delt inn i fire skyvedekker også kalt Alloktoner, og er skjærsoner eller skyveplan som faller vestover (Sandøy, 2003). Skyvedekkene ligger strukturelt oppå hverandre, derav har de navnene fra nederst til øverst (Ramberg mfl., 2006) og (Roberts, 2003);

1. Nedre (undre) allokton
2. Midtre allokton
3. Øvre allokton
4. Øverste allokton

Akselberg er en del av Øverste allokton. For å begrense oppgaven er det valgt å sette fokus på dette skyveplanet. En kort beskrivelse av de andre Alloktonene er lagt til i Tillegg B.2.

#### **Øverste allokton**

Øverste allokton finnes hovedsaklig i nordlige Trøndelag (gamle Nord-Trøndelag), Nordland og Troms. (Ramberg mfl., 2006). Øverste alloktonen ble dannet i kontinentalmarginen til Laurentia (Barnes mfl., 1985) og består for det meste av ofiolittfragmenter. Bergartene på dette skyveplanet varierer fra grønnskifer, skifer, amfibolitter, kalkspatmarmor, jernårer og ultramafitter. Det som er mest karakteristisk er de kaledonske gabbroiske til granittiske plutonene, som Bindalsbatolitten (Sandøy, 2003). Øverste allokton er delt inn i Rødningsfjell dekkekompleks (RDK) og Helgeland dekkekompleks (HDK) (Thorsnes og Løseth, 1991), (Yoshinobu mfl., 2002) og (Barnes mfl., 1985).

### 3.1.3 Nedsliting av landskapet

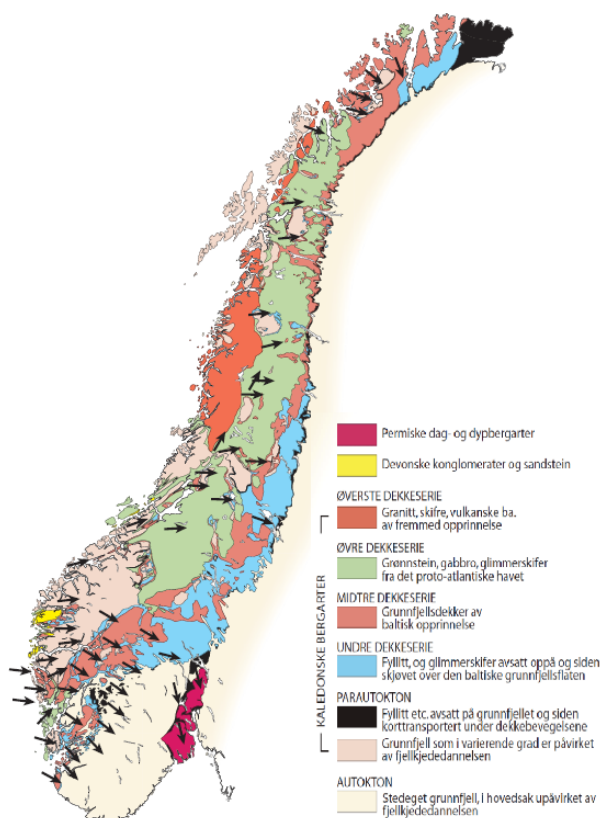
Erosjon er en naturlig prosess som går ut på å nedslite landskapet. Dette omfatter en rekke forskjellige geologiske prosesser der materialet på jordas overflate løsner og/eller løses opp og forflyttes fra et sted til annet. Dette kan være forårsaket av rennende vann, vind, havstrømmer og isbreer (Bryhni, 2018).

Gjennom tidene har jorda opplevd en rekke istider også kjent som glisialtid. Glisialtid kommer av at jordas temperatur blir vesentlig lavere, og store deler av jordas overflate blir dekket av tykke isbreer og innlandsis. Istidene kunne vare fra noen titalls tusen og opptil flere millioner år. Resultatet av istider er fjorder mellom fjellpartier og dype u-formede daler. Mye av kysten langs Norge var utsatt for iserosjon fra istider som fant sted i kvartær. Isbreer avsatte grove, darligere sortert materiale som senere blir dannet til bergarter som arkose, tillit og konglomerat (Bryhni, 2018) og (Andersen, 2000).

Landhevning i form av smelting av enorme isbreer eller kollisjon mellom jordskorpeplater, som i Scandian-fasen gjør at det dannes høydeforskjeller i landskapet. Dette gir muligheten for flytende vann i form av elver eller mindre bekker til å forflytte seg langs høyde forskjellen. Vannets hastighet er avhengig av helningen, desto høyere helning gir høyere vannhastighet, som igjen gjør det mulig for grovere materiale å bli transportert. Med tilstrekkelig hastighet kan vannet transportere forvitret og annet løsmateriale langs elveløpet. Senere, da vannet mister hastigheten, avsettes løsmaterialet, der det grovere materialet avsettes først og senere, finmaterialet. Resultatet av elveerosjon er store v-formede daler i landskapet. Bergarter som består av elve- og bekkavsatt løsmasser er som regel godt sortert (Lilleøren, 2018) og (Ramberg mfl., 2006).

### 3.1.4 Alloktonenes transportretning

Den eksakte transportretningen til de forskjellige skyvedekkene i Scandian-fasen er ikke lett å forutse da disse varierer lokalt. Lineasjon er en metode som ved grove trekk kan fortelle retningsbevegelsen til skyvedekkene. Metoden må brukes varsomt og går ut på å se på de lineære strukturene innad de deformerte mineralene i mylonittiske bergarter. Deformerte og utstrekke øyer og konglomeratpartikler, og stavformede mineraler kan gi et hint om hvilken retning deformasjonen foregikk og transportretningen til skyvedekkene. Samtidig kan det gi et hint på retningen til den største horisontale spenningen da dette som oftest er parallelt med transportretningen (Ramberg mfl., 2006).



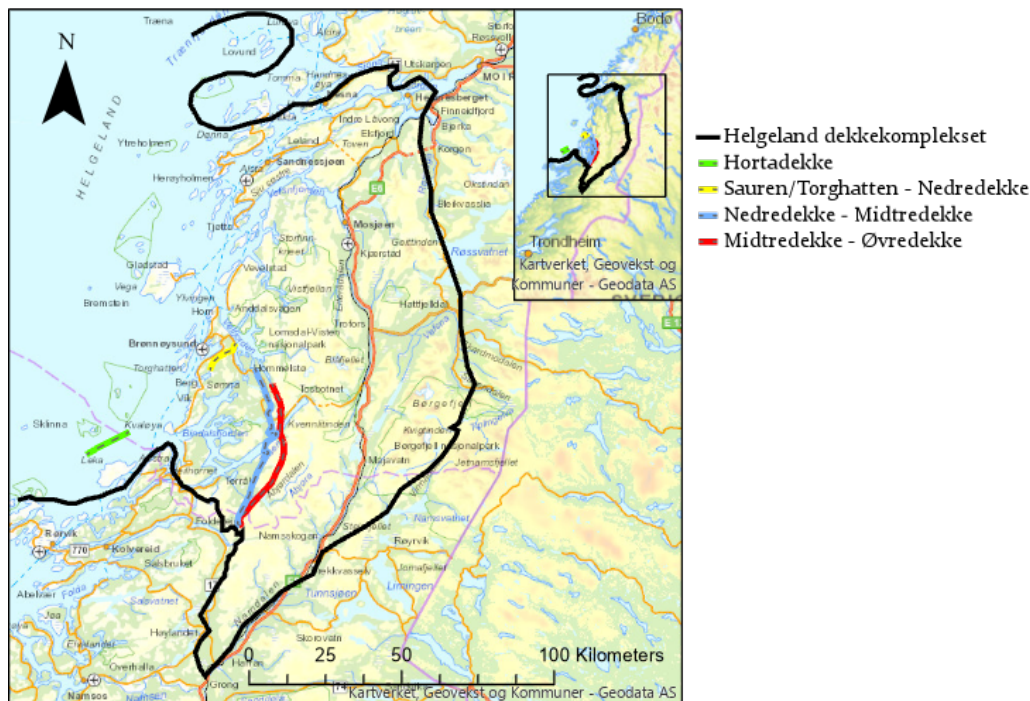
Figur 3.3: Kartet er en forenklet illustrasjon av transportretningen til de fire Alloktonene. Bildet er hentet fra Ramberg mfl., 2006

Figur 3.3 er en forenklet illustrasjon på transportretningen til de ulike skyvedekkkene rundt omkring i Norge. Fra dette kan det tolkes som at Alloktonene er blitt transportert fra hav- og kystområdet i dagens vest og innover fastlandet i dagens øst. Transportretningen i Aksleberg som befinner seg i Øverste allokton og sørlige delen av Nordland varierer, men har en overordnet retning mot Ø-NØ. For de fleste stedene er retningen  $75 - 85^\circ$  (NØ), men enkelte steder er retningen  $30 - 45^\circ$  (NØ). Spenningsorienteringen gjenspeiler i transportretningen til skyvedekkkene og lineasjonen til mineralene. I dette tilfelle vil største horisontale spenning mest sannsynlig være orientert parallelt med transportretningen (Fejerskov mfl., 2000).

## 3.2 Regionalgeologi

### 3.2.1 Helgeland dekkekompleks

#### Helgeland dekkekompleks



Figur 3.4: 1 : 1 750 000 kart over Helgeland dekkekomplekset som strekker seg fra Mo i Rana i nord, Grong i sør, Vega og Røssvannet i vest og øst. Kartet viser en tilnærming av den ytre grensa til Helgeland dekkekomplekset og grensene mellom dekkene innad dekkekomplekset. Kartet er laget i ArcGIS Pro.

Helgeland dekkekompleks befinner seg i Øverste allokton sør for Rødningfjell dekkekomplekset. Dekkekomplekset er definert som høy- og lavgrads metamorfisert berg i sørlige delen av Helgeland. Komplekset er sammensatt av interne tektoniske enheter (Gustavson, 1975) referert i (Sandøy, 2003). Det er ingen klare ytre grenser på dekkekomplekset. Dette skyldes reaktivering av ekstensjonsskjærsoner og at dekket har delvis blitt utskåret og fjernet. Hele dekkekomplekset er avgrenset av skjærsoner som stammer fra Scandian-fasen, deler ekstensjonsforkastingene og dekkesekvensen, (Sandøy, 2003). En mer detaljert skildring av ytre grensene til Helgeland dekkekompleks kan en finne i Tillegg B.3.1.

Helgeland dekkekompleks deles i dag i fem dekker (uoffisielt) der de strukturelt fra nederst til øverst er (Thorsnes og Løseth, 1991) og (Nordgulen mfl., 2008);

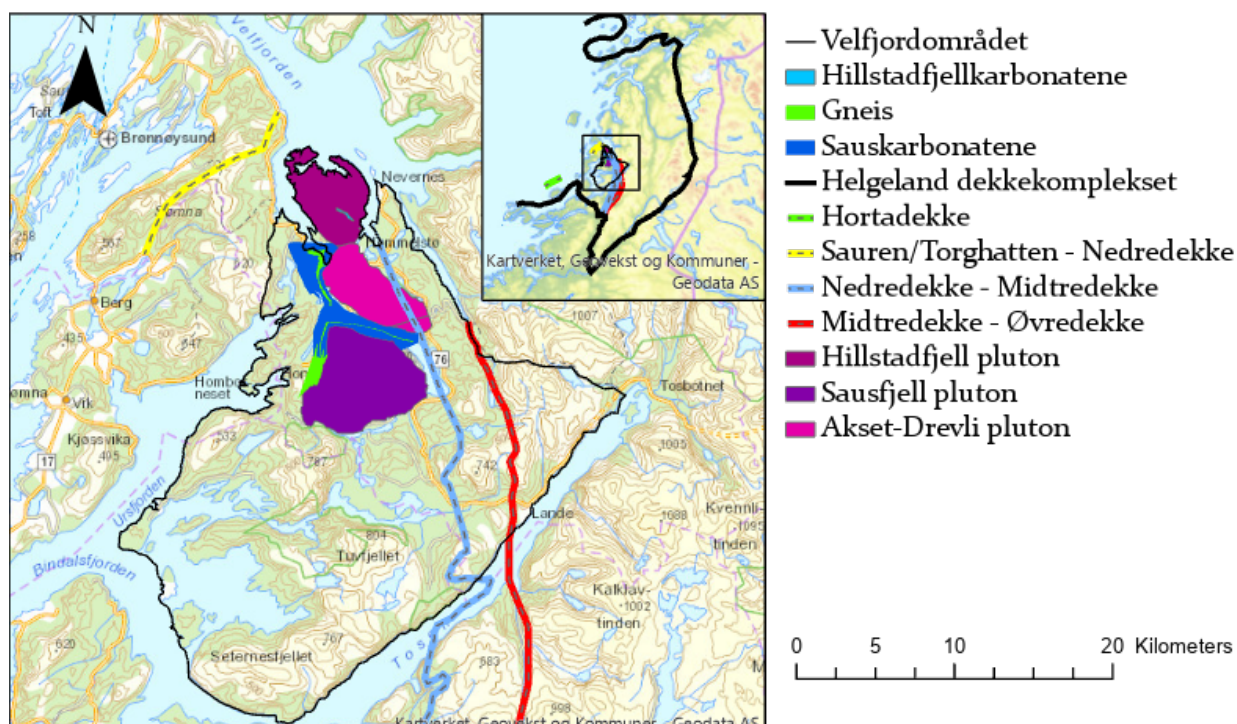
#### 1. Hortadekket

2. Sauren-Torghatten
3. Nedredekket
4. Midtredekket
5. Øvredekket

Figur 3.4 er et kart over ytre grensen og de forskjellige dekkene innenfor Helgeland dekkekomplekset. Mer om dette i kommende delkapittel, Avsnitt 3.2.2.

### 3.2.2 Velfjordområdet

## Velfjordområdet



Figur 3.5: Dette er et 1:375 000 kart over Velfjordområdet. Velfjordområdet er begrenset av Velfjord, Bindalsfjord, og Ursfjord, i nord, sør og vest. I øst er området avgrenset av linjen mellom enden av Tosenfjord og Langfjord (Tøgersen, 2011). Kartet er laget i ArcGIS Pro.

Velfjordområdet er ikke et offisielt fastsatt geologisk område, men defineres for å beskrive et område innenfor Helgeland dekkekomplekset som er av interesse for videre arbeid i denne oppgaven. Figur 3.5 er et 1:375 000 kart over Velfjordområdet som er begrenset av Bindalsfjord, Velfjord, og Ursfjord, i sør, nord og vest. I øst er området avgrenset av en linje mellom enden

Tosenfjord og Langfjord (Tøgersen, 2011).

Velfjordområdet består av 3 av de 5 dekkene Helgeland dekkekomplekset består av; Nedre-, Midtre- og Øvredekket (Thorsnes og Løseth, 1991). Dette er basert på arbeidet i (Løseth, 1985) og (Thorsnes, 1985) referert i (Sandøy, 2003). Da Akselberg befinner seg i Nedredekket, ønskes det å sette fokus på dette videre i oppgaven. Det er gjort en geologisk analyse på både Øvre- og Midtredekke. Disse dekkene er av lite interesse for videre arbeid. En kort beskrivelse av disse dekkene og grensene mellom disse dekkene er lagt til i Tillegg B.3.2.

### **Nedredekket**

I nord grenser Nedredekket til Sørfjord og Heggefjord, mens i sør grenser den til Tosenfjord. Nedredekket er avgrenset av Midtredekket i øst og Sauren-Torghattendeckket og granittiske bergarter fra Sæterfjellet i nordvest. Sørvest grenser den til Kråkgjelleplutonet (Thorsnes og Løseth, 1991) referert i (Sandøy, 2003). Dette er illustrert i Figur 3.5.

Nedredekket består blant annet av intrusive bergarter fra Bindalsbatolitten, kvarts-feltspatisk migmatisk gneis og kaliumrik skifer. Det eksisterer også forekomster av kalksilikater og kalkstein i Sauskarbonatene og Hillstadjellkarbonatene som befinner seg i nordlige delen av Velfjordområdet (Barnes mfl., 2002).

### **Grensen mellom dekkene**

Grensen mellom Sauren-Torghatten og nedredekket er tolket som en reaktivering av en normalforkastning, der høygrads migmatitter er blitt forskjøvet over lavgrads ikke-migmatiserte bergarter (Sandøy, 2003).

Fra (Thorsnes og Løseth, 1991) og (Løseth, 1985) er grensen mellom nedredekket og midtredekket tolket som en forkastningssone, og ikke intrusiv plutonkontakt og tektonisk sedimentærkontakt. Argumentene for dette er som følger (Sandøy, 2003):

- Kontakten mellom ultramafiske bergartene og nedredekket har en brå overgang, og ikke en gradvis. Samtidig kutter clinopyroksen deler som er tolket som det primære laget.
- Fra tolkning så er det mye som tyder på at strukturen på ultramafiske bergartene ikke korrelerer med strukturen til bergartene i nedredekket. Dette er tolket som at begge dekkene hadde ulike tektoniske historier før de ble brakt sammen.

- Fraværet av kontaktmetamorfose på det overliggende metasedimentære bergartene rundt de ultramafiske bergartene.
- Økende grad av deformasjon av granittiske diker innad kalkstein i nedredekkeet. Desto nærmere kontaktgrensen mellom dekkene er, jo tydeligere er det at dikene kun oppstår i nedredekkeet og ultramafiske bergartene i midtredekkeet.
- Det er også observert en sone av sterkt foliert kromitt og olivin, som er tolket som en tektonisk sone og er funnet opp til én meter fra kontaktsonen i nedredekkeet. Det er også observert økende grad av serpentisering desto nærmere en kommer den tektoniske grensen.



### 3.2.3 Plutoner i Velfjordområdet

Plutonene i velfjordområdet utgjør en del av Bindalsbatolittene som er den største av alle batolittene i Den skandinaviske kaledoniden. Bindalsbatolittene er tolket som kontinentalbue kollisjon på den laurentiske siden (Barnes mfl., 2002), (Yoshinobu mfl., 2002), (Roberts, 2003) og (Roberts, 2007) referert i (Sandøy, 2003) og dateres så langt tilbake som Tocanian-fasen (Roberts, 1988). Batolittene utgjør til sammen ca 50 stor til små intrusjoner. Bindalsbatolitten deles i dag i tre grupper, hovedsakelig ut i fra petrologi, men også forholdet deres til hoveddeformasjonen i dette området, og disse er (Sandøy, 2003):

1. Tidlig-granittiske plutoner
2. Sen-granittiske plutoner
3. Mafiske til intermediære plutoner

Intrusjonene utgjør et sterkt preg på den nordlige delen av Velfjordområdet (se Figur 3.5). Typisk karakteristikk for plutonene i Velfjordområdet, er den siste gruppen, altså mafiske til intermediære plutoner. Plutonene i Velfjordområdet består av tre store; Hillstadjfjell, Sausfjell- og Akset-Drevli pluton (Barnes mfl., 1992). Det eksisterer også to mindre plutoner; Svarthopen- og Aunet pluton (Barnes mfl., 2002).

Under Tocanian-fasen førte subduksjonen av Laurentia til at den kalde havbunns-overflaten ble skjøvet nedover til jordas indre, og påkjønning av trykk og temperatur økte. Desto lenger ned jordskorpeplaten blir skjøvet desto høyere metamorfosegrad vil det oppnås. Grønnstein, amfobolitt og eklogitt, der grønnstein er lavere grads metamorfose til eklogitt, som er høyere grad, blir dannet avhengig av subduksjonen. Trykk og temperaturøkning fører til dehydrering, der volatiler som CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>O, stiger opp til de overliggende mantelbergartene som kalles mantelkilen. Ved tilføring av volatiler senkes bergartens smeltepunkt. Dette gjør at bergarter i både den nedsenkede platen og mantelkilen smelter, og magmaen som genereres vil stige opp i kontinentalskorpen (Barnes mfl., 1992).

Plutonene i Bindalsbatolittene har trolig gjennomgått to stadier av smelting, der det første stadiet består av magmagenerering, som skjer i mantelkilen og har en sammensetning av basalt. Denne basaltiske magmaen finner veien opp mot bunnen av den lettere skorpa og størkner der. Videre magmatisering fører til partialsmelting der resultatet blir en lysere og lettere magma som er så lett

at den kan stige opp i skorpa. Lenger oppe i skorpa størkner magmaen og blir en del av omgivelsen. Størkningsbergarten er relativt lettere og har mindre stivhet enn den størkningsbergarten den opprinnelig kommer fra (Barnes mfl., 1992).

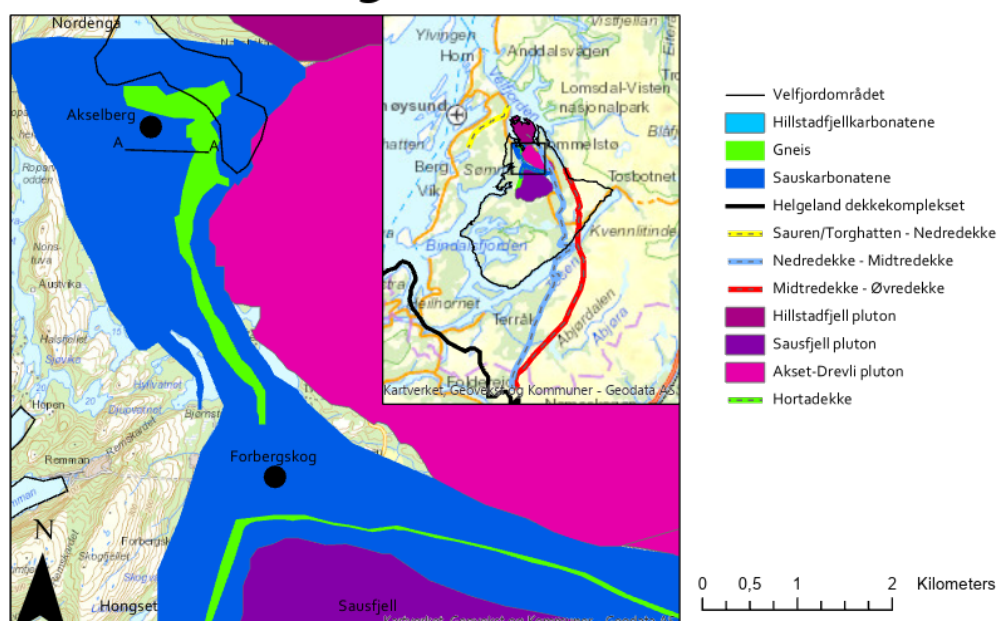
Hillstadjellet pluton anses å ha blitt dannet i to forskjellige faser; den første fasen bestod av gabbroisk pluton, og den andre fasen var av større størrelsesorden og en sammensetting av dioritt til kvarts-monzonitt (Barnes mfl., 1992). Akset-Drevli pluton består av dioritt og jernrik gabbro, mens Sausfjellet pluton er dominert av diorittiske bergarter (Sandøy, 2003). Aunet pluton består av gabbro og befinner seg i deler av Hillstadjellet- og Akset-Drevli pluton, noe som indikerer at den er yngre enn de to andre plutonene (Dumond, 2002). Svarthopen pluton kjennetegnes av de store områdene med kontaktgranitter og granodioritt (Barnes mfl., 2002).

#### **3.2.4 Migmatitter i Velfjordområdet**

Regionalt domineres enkelte steder i dette området av lagdelte og godt strukturert migmatitter, med veksling av soner av aluminium-silikat til arer av kvartsfeltspat. Da Velfjord plutonene intruderte, resulterte dette til lokal kontaktsmelting i jordskorpa, gjennom dehydrering av lokale mineraler som glimmer i semipeltittiske til peltittiske bergarter. Dette skjedde spesielt ved kontaktsonen av de store Velfjordsplutonene, Hillstadjellet, Sausfjellet og Akset-Drevli. Ved minkende avstand fra kontaktsonen ble det en overgang fra stromatiske migmatitter til diateksitter. Sonene av diateksitter utgjør en sone med en avstand på 500m fra plutonene (Barnes mfl., 2002) referert i (Tøgersen, 2011).

## 3.2.5 Nordlige Sauskarbonatene

## Nordlige Sauskarbonater



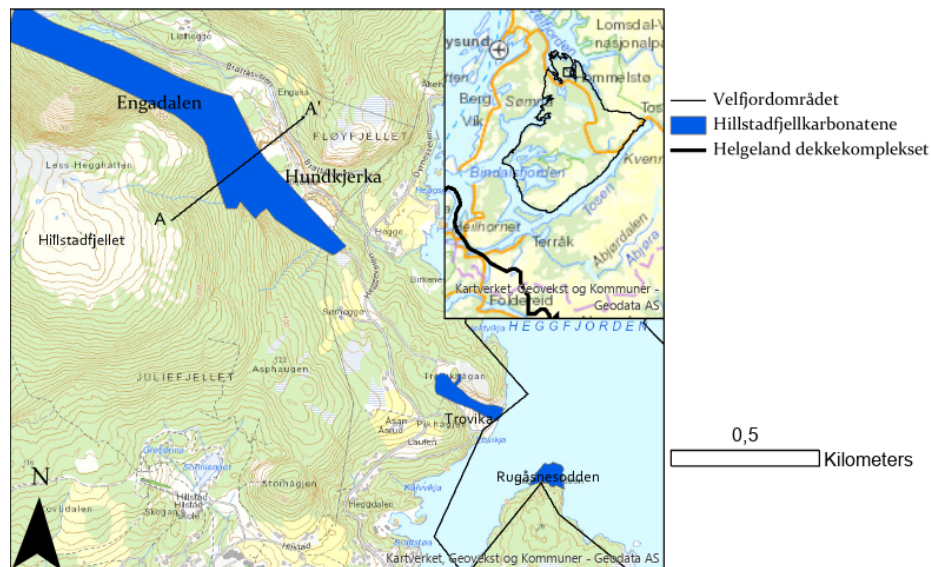
Figur 3.6: Dette er et 1:50 000 kart over nordlige Sauskarbonatene. Kartet er laget i ArcGIS Pro. Kartet kan avvike noe fra virkelighet, men brukes som en skjematisk oversikt av nordlige Sauskarbonatene som befinner seg i nordlige delen av Velfjordområdet.

Nordlige Sauskarbonatene befinner seg i nordlige delen av Velfjordområdet. Det pågår diskusjoner på nordlige grensen av Sauskarbonatene, der det blant annet diskuteres både indre- og ytre grenser av kalksteinene som befinner seg i dette området. Ytre grensen er definert som grensen mellom kalkstein og gneisisk til migmatiske veggberg, og kalksteinen og kontakten med Velfjordplutonene. Denne grensen er forskjellig fra grensen satt av for kalkstein av økonomisk interesse, der råmaterialeverdien til karbonatene i Sauskarbonatene er av forskjellige verdier (Sandøy, 2003). Se Figur B.2 i Tillegg B.3.3 for et mer detaljert kart av nordlige delen av Sauskarbonatene som viser de forskjellige kalksteinlagene.

Grensen på nordlige delen av Sauskarbonatene er basert på kartlegging fra (Myrland, 1972) og senere fra (Adam, 1988), (Fabian, 1990), (Lieham og Bruhn, 1988), (Rüffer, 1988d), (Rüffer, 1988c), (Rüffer, 1988a) og (Rüffer, 1988b) med veiledning av M. Schönfeld og viser til den ytre grensen. Grensen som er satt på overflaten av nordlige Sauskarbonatene består av tre armer bestående av kalkstein som møtes noe nord for Sausfjellet. Østlige armen strekker seg under Sausvannet og fortsetter sørøstover. Den sørlige armen av Sauskarbonatene strekker seg til Hongset. Nordlige armen strekker gjennom Hyllvannet i vest og nesten hele veien opp til Nordenga (Sandøy, 2003).

## 3.2.6 Hillstadjellkarbonatene

## Hillstadjellkarbonatene



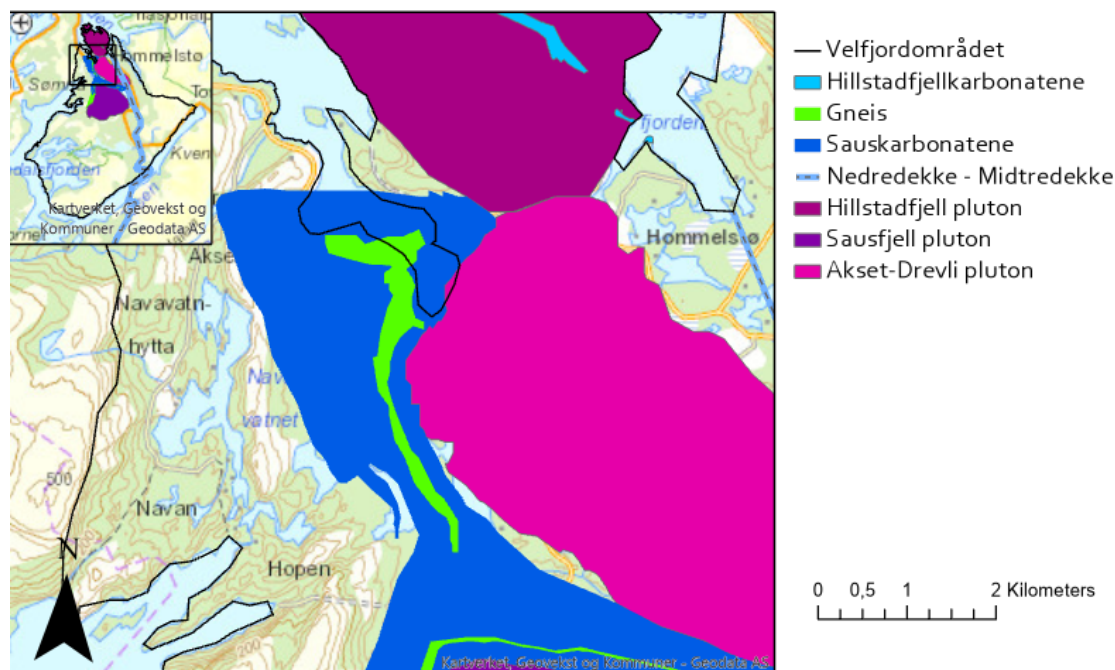
Figur 3.7: Et 1:10 000 kart over Engadalen, Trovika og Rugåsnesodden som tilsammen utgjør Hillstadjellkarbonatene. Kartet kan avvike noe fra virkelighet, men brukes som et skjematisk oversikt av Hillstadjellkarbonatene som befinner seg i nordlige delen av Velfjordområdet. Kartet er laget i ArcGIS Pro

Nord for Sauskarbonatene, innenfor Hillstadjell plutonet eksisterer det kalksteinsforekomster. Kalksteinsforekomstene møter dagen på tre ulike steder; Engadalen, Trovika og Rugåsnesodden. Det er mye som tyder på at kalksteinene her stammer fra en og samme forekomst og går under navnet Hillstadjellkarbonatene (Watne, 2001). Disse er markert på 1:10 000 kartet i Figur 3.7.

### 3.3 Lokalgeologi

#### 3.3.1 Akselbergområdet

#### Akselbergområdet



Figur 3.8: 1:50 000 kart over Akselbergområdet og en oversikt over de forskjellige plutone og karbonatene. Kartet er laget i ArciGIS Pro. Kartet kan avvike noe fra virkelighet, men brukes som et skjematisk oversikt av Akselbergområdet.

Akselberg befinner seg vest for Hommelstø, sør og mellom Aunbukta og Naustvik og en god del nord for Hyllvannet, og er i dag et dagbrudd der det drives bergverksdrift. Akselbergområdet er i denne oppgaven definert som nordlige delen av Velfjordområdet som er en del av nedredekke i Helgeland dekkekomplekset, og inneholder rikelig med karbonatforekomster. Her strekker den seg fra Hillstadjell plutonet i nord, Akset-Drevli plutonet i øst og Sausfjellplutonnet i sør og Navavanet i vest (se Figur 3.8).

### Bergartsbeskrivelser i Akselberg

Det er en rekke forskjellige typer kalkstein i Akselberg. I dette avsnittet deles disse bergartene i seks forskjellige typer, der det nevnes kort om ulike egenskaper som skiller de fra hverandre. Bergartsbeskrivelsen er hentet fra (Watne, 2001). Figur B.2 i Tillegg B.3.3 illustrer lagdelingen til de ulike bergartene i dette området.

- Flekketekalkstein:

Flekketekalksteinen består av kalkspattekalkstein med grafittagglomerater. Bergarten er hvit, men noe sjeldnere lysegrå, og består av svarte flekker bestående av grafitt. Grovkornene er i størrelsesorde, 5 - 10 mm. Det er utviklet en svak grad av foliasjon. Grafittflekkene er langstrakte og orientert parallelt til foliasjonen.

- Grå kalkstein:

Denne kalksteinen består av kalkspat med finere grafitt. Denne bergarten er fra lysegrå til grå, og har en kornstørrelse av medium grad, 1-4 mm. Grafitten i denne bergarten er mye finere enn flekketekalksteinen. Denne bergarten kan bli funnet ved transittsonen mellom flekkete- og båndetekalkstein.

- Flekkete-båndetekalkstein:

Denne bergarten befinner seg ved overgangsonen av flekkete- og båndetekalkstein og kan bli funnet ved hengeveggen i Akselberg. Kalksteinen består av båndede kalkspat med grafittagglomerater, og kornstørrelsen har en varierende størrelse, 1-5 mm.

- Båndetekalkstein:

Denne kalksteinen er båndet fra cm til dm, med vekslende lag av lysegrå til mørkegrå lag. Kornene består av fin til medium, med en kornstørrelse fra 2 til 7mm.

- Uren kalkstein: Uren kalkstein består av grå til brungrå, fine kornstørrelser som er mindre enn 2mm. Kalksteinen består av kvarts, feltspat, mica, amfibol og grafitt.

- Sulfidflekkete kalkstein:

Denne bergarten består av sulfidbærende magnesium-kalkspat, og ser ut som en grålig variasjon av flekketekalkstein. Gråfargen kan være fra lysegrå til mørkegrå, det er også observert nesten svartfarget variasjon av denne typen i Akselberg. Kornstørrelsen har en variasjon på 1 – 3mm. Grafittinnholdet i kalksteinen er veldig lite til nesten ingenting.

### **3.4 Strukturgeologisk analyse i Akselbergområdet**

Dette delkapittelet tar for seg strukturgeologisk analyse lokalt i Akselbergområdet. Det må nevnes at det eksisterer begrenset mengde på geologisk litteratur på dette området og enda mer begrenset når det kommer til strukturgeologisk litteratur. Akselbergområdet består av tre store og to små plutoner. Det velges å se bort fra de to små; Aunet- og Svarthopen plutonet da disse er relativt mye mindre i forhold til de tre andre og har lite betydning for analysen. Det var ønskelig å gjøre en strukturgeologisk analyse på de tre store plutonene; Sausfjell-, Hillstadjell- og Akset-Drevli plutonet, men det ble dessverre ikke funnet litteratur på de to sistnevnte. Det var også ønskelig å utføre en strukturgeologisk analyse på både Trovika og Rugåsnesodden som er en del av Hillstadjellkarbonatene, men det ble ikke funnet noe litteratur på disse karbonatforekomstene.

Dette delkapittelet tar for seg strukturgeologisk analyse av Sausfjell plutonet, Engadalen som er endel av Hillstadjellkarbonatene og til slutt nordlige Sauskarbonatene. Mye av den strukturgeologiske analysen av Sausfjell plutonet er basert på arbeidet i Dumond mfl., 2005, mens den strukturgeologiske analysen av Engadalen og nordlige delen av Sauskarbonatene er basert på arbeidet til T. Watne og K. Moen i Watne, 2001.

Tillegg A.3 tar for seg en kort introduksjon til strukturgeologi med grunnleggende begreper som brukes og beskrivelser av ulike former. Alle figurene er hentet fra Rowland mfl., 2007, der enkelte figurer er blitt modifisert i Adobe Illustrator.

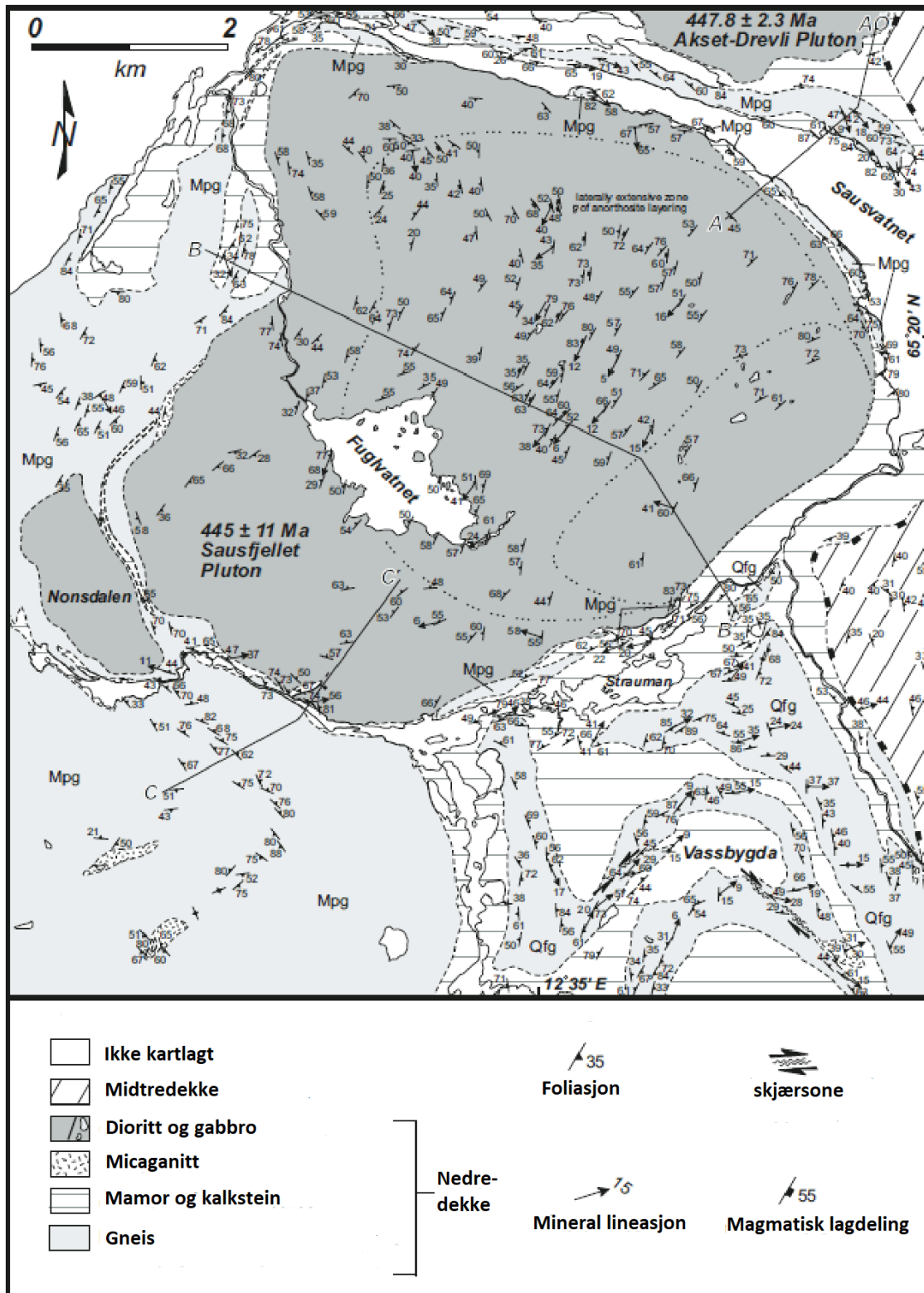
#### **3.4.1 Sausfjell plutonet**

I Tocanian-fasen ble det utviklet kontinentalbuesystemer langs den kontinentale grensen. Under en buekkollisjonshendelse, ble felsiske og kvartsfeltspatiske bergarter migmatisert, samtidig deformasjon i form av foldning. I disse vertsbergartene ble det senere dannet en rekke aluminiumsrike plutoner. Dette skjedde fra 477 til 468 Ma (Barnes mfl., 2002) og (Yoshinobu mfl., 2002) referert i (Dumond mfl., 2005) og senere, 448 – 430Ma. Plutonene som ble dannet i disse periodene utgjør Bindalsbatolittene, og i Akselbergområdet representerer dette; Hillstadjellet,  $447,0 \pm 3,2$  Ma, Akset-Drevli,  $447,8 \pm 2,3$  Ma og Sausfjellet,  $445 \pm 11$  Ma (Yoshinobu mfl., 2002).

Sausfjell plutonet består hovedsakelig av dioritt og gabbro, som er indusert i minst to stadier. Det første stadiet bestod av magma bestående av gabbro, og den andre og største bestående av dioritt. Induseringen bestod vekslende av stopp og duktil strømming av magma inn i de eldre vertsbergar-



tene.



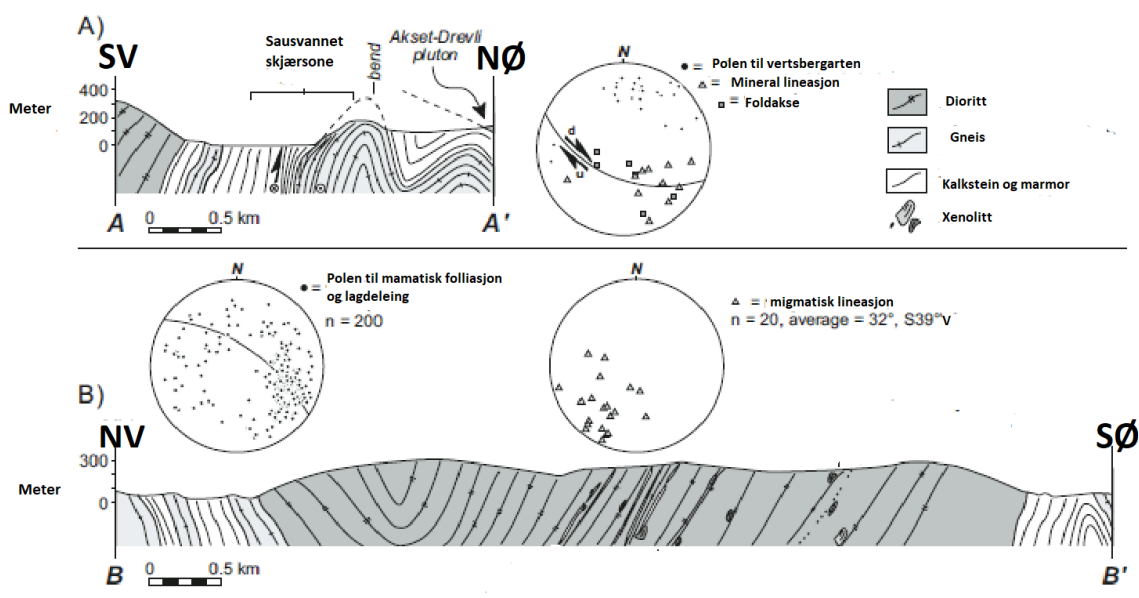
Figur 3.9: Et oversiktbilde av Sausfjell plutonet med ulike målinger av strøk, fall og lineasjon. Bildet er hentet fra Dumond mfl., 2005 og blitt modifisert i Adobe Illustrator.

I sørvest og vest er kontaktsonen i Sausfjell pluton dominert av migmatisert felsisk gneis. Fra nordvest gjennom nord og øst til sørøst er plutonet for det meste avgrenset til kalkstein og marmor, med unntak av enkelte kontaktområder som grenser til migmatisert felsisk gneis. Dette gjel-



der spesielt i sørlige og noe i østre regionen av plutonet. Kalksteinen og marmoren i dette området stammer fra nordlige Sauskarbonatene. Store innstrømmingsmengder av magma kombinert med høyt trykk og temperatur resulterte med store utvidelser av magmakammerene i vertsbjergartene, og kontaktsmelting og metamorfose av migmatitter i kontaktområdet (Barnes og Prestvik, 2000) referert i (Dumond mfl., 2005). Beviset på dette er avbøying av litologiske kontaktområdet og foliasjonsbaner i de omkringliggende vertsbjergartene (Dumond mfl., 2005). Dette gjelder spesielt nær grensen i sørvest og sørøst, og dette kan medføre til påvirkning av det lokale spenningsregimet.

Fra strøk og fall målinger i øst kommer det fram at kontaktsonen her har avbøying av foliasjon og litologisk kontakt i bratt nedfallende orientering parallelt med kontaktgrensen til marmor og kalkstein som plutonet grenser til (Barnes mfl., 2002) referert i (Dumond mfl., 2005). Langs de nordøstlige og sørøstlige grensene av plutonet er det enkelte områder migmatisk gneis som sveller langs strøket og blir sideveis diskontinuerlig. I disse områdene og langs den sørvestlige grensen er det svak til moderate og tette antiformale folder som er noe tiltet sammen med metamorfiske lagdeling i marmoren og kalksteinen. Disse strukturer danner til sammen diskontinuerlige skjærsoner som fortsetter innover plutonet (Dumond mfl., 2005).



Figur 3.10: To vertikale snitt A-A' og B-B' av Sausfjell fra Figur 3.9. Bildet er hentet fra Dumond mfl., 2005 og blitt modifisert i Adobe Illustrator.

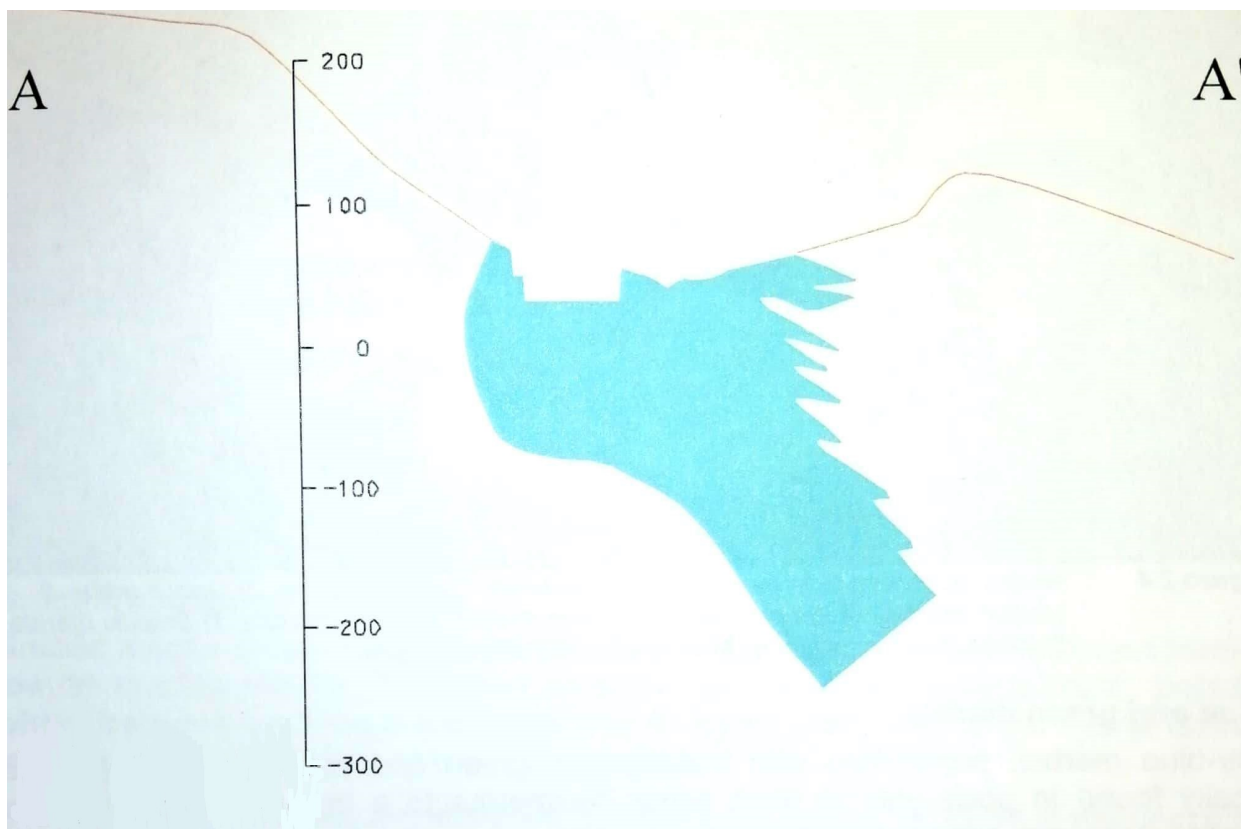
Langs den nordlige siden av plutonet, eksisterer det en 1 km bred skjærson som treffer vest-nordvest, parallelt med den bratte sørvest-fallende kontaktsonen. Skjærsonen er avgrenset på nord-

siden av Akset-Drevli pluton (se Figur 3.10 A) og kalles Sausvannet skjæresone. Innenfor Sausvannet skjæresonen er migmatiskfelsisk gneis som er parallell til foliasjonen. Dette forekommer også i skjærbånd som er kuttet på tvers av foliasjonen. Foliasjon i skjæresonen faller generelt bratt mot sørvest.

Ved å se på Figur 3.9 kommer det frem at lineasjonstrukturen i Sausfjell plutonet og bergartene rundt har en varierende retning. Lineasjonretningen innad Sausfjell plutonet variere lokalt, men den generelle retningen er  $220 - 235^\circ$  fra nord (SV). Ved å se på lineasjoner som er definert av strukturen til sillimanitt hos migmatiskfelsisk gneis i området varier retningen enda mer (Dumond mfl., 2005. Nord og nordøst for Sausfjell plutonet ligger den på  $110 - 120^\circ$  fra nord (SØ). Sørøst for plutonet har lineasjonstrukturene en retning som er tolket til å være  $20 - 35^\circ$  for nord (NØ). Det er vanskelig å si hva dette kommer av. Alderen på noen av bergartene er forskjellig og transportretningen kan har variert med tiden.

### **3.4.2 Engadalen**

Engadalen er en del av Hillstadjellkarbonatene og befinner seg inni Hillstadjell plutonet. Karbonatforekomsten er lokalisert vest for Heggefjorden og nord for Hommelstø. Det diskuteres ennå om Hillstadjellplutonet er en mega-xonolitt eller om den er blitt presset sammen av to stadier av magma. I tillegg til Engadalen eksisterer det andre mindre deler med kalkstein i plutonet, som Trovika og Rugåsnesodden (se Figur 3.7). Videre i denne oppgaven antas at Hillstadplutonet er introdert i to stadier; der det første stadiet er introduksjon av magma bestående av gabbro til dioritt og det andre stadiet bestående av magma av monzodioritt til kvartsdioritt. De to sist nevnte er observert i nærheten av kalksteinen. Det er mye som tyder på at kalksteinen her har gjennomgått en del kontaktmetamorfose. Resultatet av dette er at kalksteinens mineralogi varierer endel fra mineralogien i både Akselberg og Forbergskog (Barnes mfl., 1992) referert i (Watne, 2001).



*Figur 3.11: Vertikall snitt A-A' fra Figur 3.7 av Hundkjerka som er den sentrale delen av Engadalen. I snittet er den lyseblå delen kalkstein. Snittet er hentet fra Watne, 2001 og blitt modifisert i Adobe Illustrator.*

Strukturen og tykkelsen til Engdalen varierer langs strøket og dybden. Strøket er rettet generelt mot sørvest, med et bratt fall mot nordøst. Engadalen er sterkt preget av foldning, noe som gjør at det er meget stor lokal variasjon i området. I den sentrale delen av Engadalen, også kjent som Hundkjerka, er kalksteinen 200m bred på overflaten og blir ca 100m bred ved 100m dyp. Dette er illustrert i Figur 3.11. En annen ting som bærer preg i dette området er boudinere av micagneis og dioritt. Boudinene varierer i størrelse, fra desimeter til flere titalls meter (Watne, 2001). Boudinene er et tegn på sterke ekstensjonskrefter.

### 3.4.3 Nordlige Sauskarbonatene

De interne forholdene og grensene som er kartlagt er basert på arbeidet til T. Watne og K. Moen. Det er benyttet GPS, boredata, kartlegging med totalstasjon og blotningskartlegging, der det senere er blitt gjort tolkning av geologien i området. Det er viktig å huske at det er gjort en tolking og kartleggingen kan avvike fra virkeligheten. Videre i oppgaven benyttes arbeidet til T. Watne og K. Moen for å forstå den strukturgeologien i området.

Det ble konkludert med at den nordlige delen av Sauskarbonatene består av seks individuelle enheter av kalkstein. I samme området med de seks kalksteineneheter eksisterer det en enhet med silikatrik kvarts-feltpatrick gneis, og har en bredde som varierer fra 40 til 400m. Denne gneisenheten ser ut til å eksistere fra nord hele veien til sør av nordlige Sauskarbonatene. Dette er illustrert i Figur 3.6). Gneisen ser ut til å være foldet og har vergens mot vest, like ved dagbruddet i Akselberg. Ut i fra boredata er det mye som tyder på at det eksisterer et nytt lag med tilsvarende gneis under kalksteinlaget. Dette kan bli tolket på to ulike måter. Dette laget kan enten være foldet eller at dette er et tynnere og nytt lag. Førstnevnte virker mest korrekt. Sørøver tynnes gneislaget ut og til slutt forsvinner. Dette kan komme fra enten erosjon eller deformasjon. Like nord for Sausfjell plutonet eksisterer det en enhet av gneis, om dette er samme gneislaget eller et nytt lag er vanskelig å si. Det nye gneislaget kan bli sett i armene i øst og sør av det nordlige Sauskarbonatet (Sandøy, 2003). Dette er også illustrert i Figur 3.6.

Mellom Forbergskog og Hyllvannet og videre mot nordligste delen, Akselberg, er det kun Akselberg som stikker opp på overflaten. I sør kan disse enhetene bli sett på overflaten sør for Hyllvannet og sør for Forbergskogen. Alle disse tre enhetene er tolket til å være foldet, der det er en dominerende antiformal i nordøst, og i sør mellom Hyllvannet og Forbergskog er det antiformal i øst og et synform-antiform par i vest. Nordlige delen ved Akselberg er det tolket som to foldningsarmer som møtes og ikke to forskjellige lag. Det er mye som tyder på at foldningen er en tiltet isoklinal antiformal (Sandøy, 2003).

Ved å se på det vertikale snittet A-A', Figur 3.12 fra Figur 3.6, kan det virke som lagene består av plane lag som har et fall fra 30 til 60° i retning mot øst. I virkeligheten er lagene kraftig foldet, isoklinal og tiltet. Her er foldningsarmene tilnærmet parallelt med toppen av hengselssonen. Mye av geologien i Sauskarbonatene er preget av folding av intrusjoner, sedimentære- og meta-sedimentære lag i området. Det er også observert boudiner, utstrekking av et strekt lag, enkelte steder (Sandøy, 2003). Boudiner har som regel en boudinlinje som oftest står vinkelrett på minste hovedspenningen (Rowland mfl., 2007).



Figur 3.12: Et vertikalt snitt A-A' fra Figur 3.6 ved Akselberg. Grønne lagene tilsvarer gneis og resterende lagene; lyse blå, mørke blå og lilla tilsvarer kalkstein. Figuren er hentet fra Watne, 2001.

Den generelle retningen på den nordlige armen mot Akselberg i Sauskarbonatene er NNØ. Fra målinger av strøk derimot beskriver et sinusformet mønster som strekker seg fra N20E til N40W. Fra blotningskartlegging og strukturgeologiske målinger er det tre mulige måter å tolke dette (Sandøy, 2003);

1. Dette kan skyldes at to foldninger har høy vinkel mellom foldningsaksen og foldningsaksialplanet, noe som gjør at den ene foldningen får en nord til nordvest foldningsakse, mens den andre får en nordøstlig foldningsakse.
2. Foldningene har en høy vinkel i foldningsaksialplanet, men lavere vinkel mellom foldningsvinkelen.
3. En kombinasjon av de to overnevnte.

## 4 Analyse av rådata

### 4.1 Systematisering av rådata

SINTEF har utført en god del bergmekaniske tester på ulike anlegg i både Norge og i utlandet. Fra disse testene sitter de nå med en god mengde rådata av ulike bergmekaniske egenskaper fra de forskjellige anleggene. En del av arbeidet til undertegnede i prosjektoppgaven var å systematisere rådataene fra SINTEF og finne hvilke data som er av interesse for videre arbeid i forhold til Akselbergs fremtidige undergrunnsuttak.

I alt var det 291 anlegg som ble kartlagt. Det ble i første omgang gjort en grovsortering og senere finsortering. Grovsorteringen gikk ut på å sile ut anlegg som ikke befant seg i Nordland og Trøndelag. Rådata fra anlegg i nordlige Trøndelag (gamle Nord-Trøndelag) og sørlige Nordland var av stor interesse. Etter grovsorteringen var det nå rådata fra 37 anlegg av interesse. Disse skulle senere bli finsortert.

For å kunne finsortere ble det først utarbeidet en forståelse av geologien og ulike geologiske prosesser, både regionalt og lokalt i området. Fra Avsnitt 3.1.2 kommer det frem at Akselbergområdet befinner seg i øverste allokton. Geologien her er mer komplisert enn det som først ble antatt, og det ble derfor gjort et grundig litteraturstudie på området for å få en bedre geologisk oversikt og forståelse. Øverste allokton er delt inn i to dekkekomplekser, Helgeland dekkekompleks og Rødningfjell dekkekompleks. Siden Akselbergområdet befinner seg i Helgeland dekkekomplekset, ble det naturlig å sette fokus på dette og se bort fra den andre. Fra Avsnitt 3.2.1 kommer det frem at Helgeland dekkekomplekset er i dag delt inn i 5 forskjellige dekker. Velfjordområdet inneholder 3 av de 5 dekkene (se Avsnitt 3.2.2); nedre-, midtre – og øvredekke. Fra dekkegrensene nevnt i Avsnitt 3.2.2 konkluderes det med at spenningsregimet og orienteringen innad de forskjellige dekkene kan variere. Akselberg som befinner seg i Akselbergområdet, er en del av nedredekke, og derfor settes det fokus på anlegg innenfor nedredekke. Innenfor nedredekke og Akselbergområdet er det gjort oppmerksom på to områder som er av stor interesse, nordlige Sauskarbonatene og Hillstadvjellkarbonatene. Dette benyttes videre for inndelingen av 4 forskjellige kategorier for finsorteringen av anleggene:

1. Rød-liste:

Anlegg utenfor Helgeland dekkekomplekset. Anleggene er listet i Tabell 21 i Tillegg C.1 (se Figur C.1 i Tillegg C.1 som er et kart over de ulike anleggene) og er av liten interesse.

Anleggene fra denne lista blir ikke tatt med videre i analysen.

## 2. Oransje-liste:

Denne lista består av anlegg innenfor Helgeland dekkekomplekset, men utenfor nedredekket. Anleggene er listet i Tabell 22 i Tillegg C.1 (se også Figur C.1 i Tillegg C.1 som er et kart over de ulike anleggene) og er av lite interesse. Anleggene fra denne lista blir ikke tatt med videre i analysen.

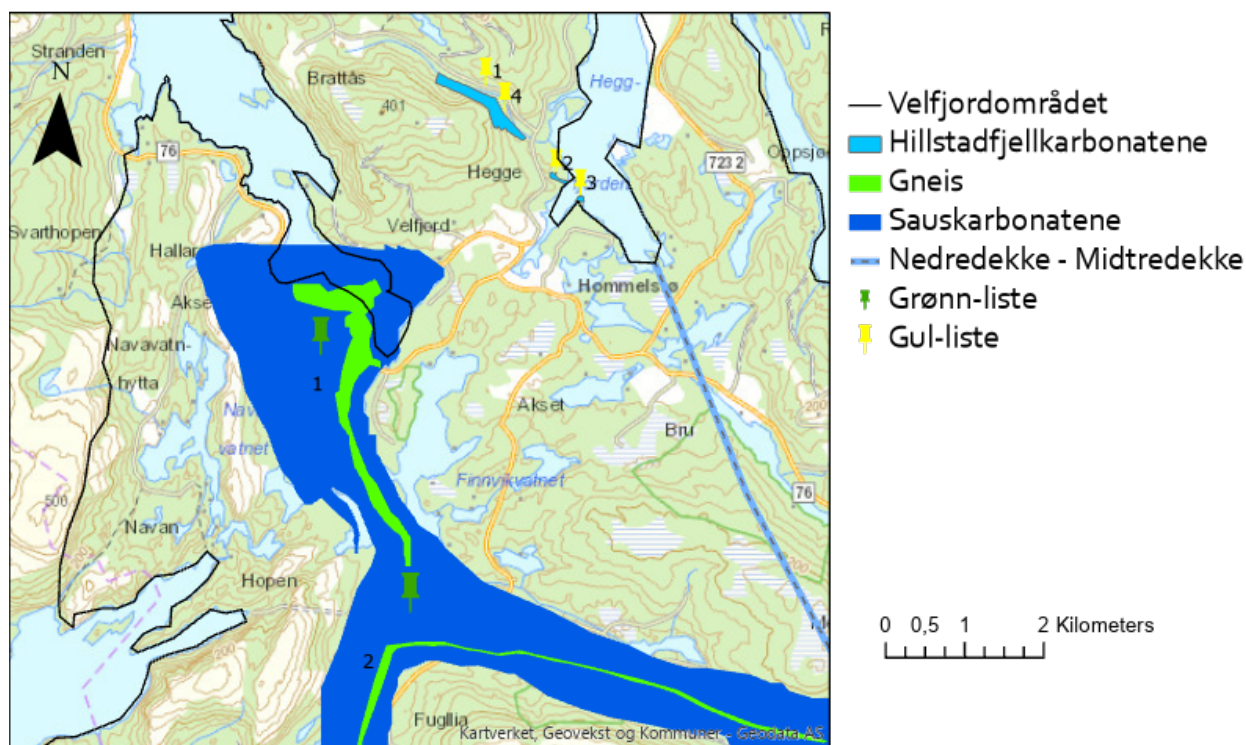
## 3. Gul-liste:

Anlegg innenfor nedredekket, men utenfor nordlige Sauskarbonatene. Anleggene fra denne lista består av anlegg innenfor Hillstadjellkarbonatene. Anleggene er listet i Tabell 1 og se Figur 4.1. Anleggene fra denne lista er av interesse og tas med videre i analysen.

## 4. Grønn-liste:

Anlegg innenfor nordlige Sauskarbonatene. Anleggene er listet i Tabell 2 og se Figur 4.1. Anleggene fra denne lista er av interesse og tas med videre i analysen.

# Nordlige Sauskarbonatene og Hillstadjellkarbonatene



Figur 4.1: Et 1:75 000 kart over nordlige Sauskarbonatene og Hillstadjellplutoner. Kartet viser også gul- og grønn-liste over anlegg som er av interesse for bergspenningsanalysen. Kartet er laget i ArcGIS Pro.

Lokalitet	Navn	Fylke	Anlegg
1	Engadalen	Nordland	Gruve
2	Trovika	Nordland	
3	Rugåsnesodden	Nordland	
4	Hundkjerka	Nordland	Gruve

*Tabell 1: Gul-liste representerer de anleggene som befinner seg innenfor nedredekket, men utenfor Sauskarbonatene. Anleggene og lokalitene fra denne lista er karbonatforekomster som er en del av Hillstadfjellkarbonatene. Disse anleggene er av middels interesse for analysen.*

Lokalitet	Navn	Fylke	Anlegg
1	Akselberg	Nordland	Gruve
2	Forbergskogen	Nordland	Gruve

*Tabell 2: Grønn-liste representerer de anleggene som befinner seg innenfor nordlige Sauskarbonatene og er av stor interesse for videre analyse.*

### Konklusjon

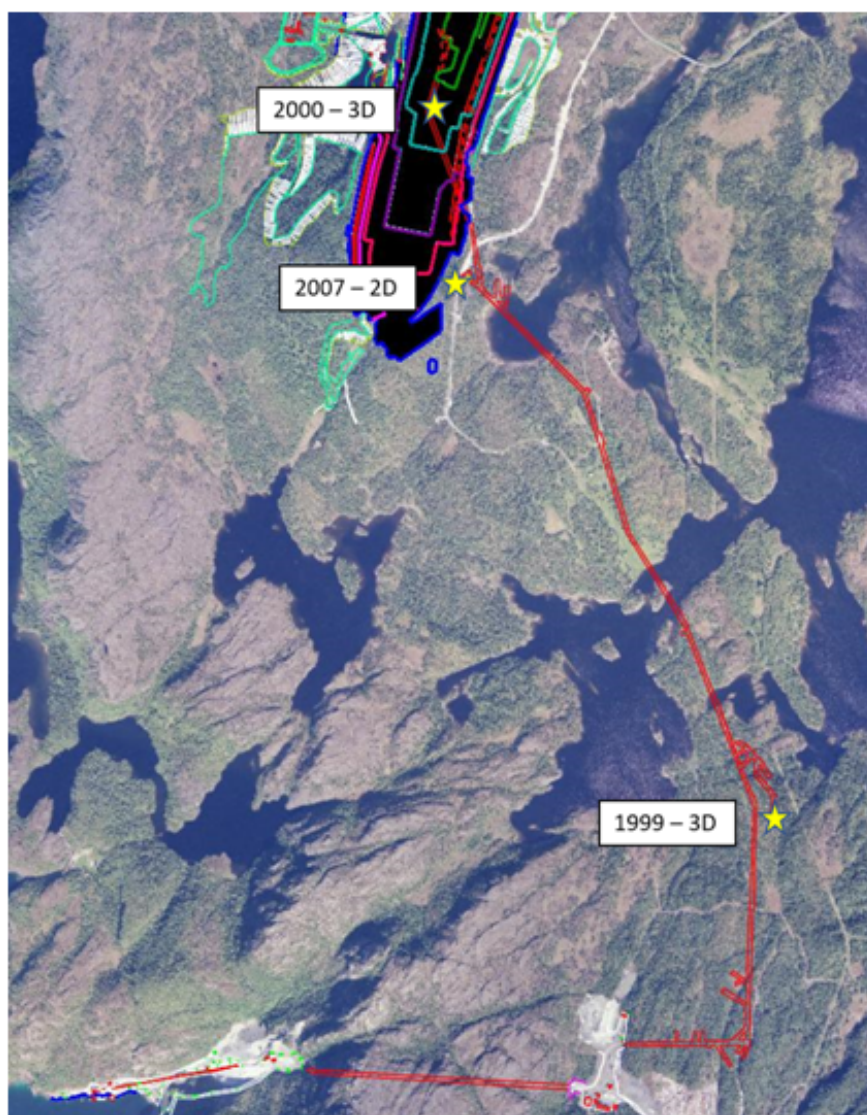
Fra både grovsorteringen og finsorteringen ble det til slutt 4 anlegg; Engadalen, Hundkjerka Akselberg og Forbergskog, og 2 lokaliteter; Trovika og Rugåsnesodden som var av interesse for videre analyse. Det ble prøvd å finne rådata fra både Trovika og Rugåsnesodden, men dette lot seg ikke gjøre. Hundkjerka er en del av Engadalen, derfor velges det å se på Engadalen i helhet. Videre i analysen slås disse to sammen til ett anlegg, Engadalen. For videre analyse av rådata ønskes det å se nærmere på følgende anlegg;

1. Engadalen
2. Forbergskog
3. Akselberg



## 4.2 Rådata fra Engadalen, Forbergskog og Akselberg

Dette avsnittet består av bergspenningsmålinger og bergmekaniske egenskaper for de forskjellige anleggene. Rådataene er hentet fra rapport STF 22F97015 - Engadalen (SINTEF, 1997b), STF 22 F99082 - Forbergskog (SINTEF, 1999), Sintef testrapport: E-modul, Poissons forhold, enakset trykkfasthet (SINTEF, 1997a), Sintef rapport: Bergspenningsmålinger ved Akselberg, Velfjord (SINTEF, 2000) og STF 22 F00071 - Akselberg (Grøv og Holmøy, 2000). For beregning av spenningsresultatene er programmet Determination of In Situ Stress by Overcoring (DISO) benyttet. Dette er et program som er utviklet ved SINTEF Bergteknikk som gir et middelværdi for målingene og en statistisk vurdering av resultatene. Det er utført laboratorietester for å finne de resterende bergmekaniske egenskapene. Grunnet begrenset med tid er det valgt å ikke gå i detalj på de ulike metodene. Disse kan bli funnet i de forskjellige rapportene.



Figur 4.2: Oversiktskart over målesteden i Akselberg (nord) og Forbergskog (sør). Kartet er hentet fra Bunkholt, 2019.

Figur 4.2 er et oversiktskart som viser hvor de ulike målestedene i Aksleberg (nord) og Forbergskog (sør). Her velges det å se bort 2D-målingene fra Akselberg, da disse avviker fra andre verdier som er målt ved samme lokalitet. Det var ønskelig å finne målestedet fra Engadalen, men dette lot seg ikke gjøre.

#### 4.2.1 Engadalen

##### Målestedet

Forekomsten ved målestedet består av om lag 70 % marmor med linser og innslutning av dioritt, glimmerskifer og brucitt. Sideberget ved forekomsten består av gabbro som er en del av Hillstadfjell plutonet. Det er utført 9 enkeltmålinger med tredimensjonale måleceller i hulldybder fra 10,0 m til 14,0 m. Målforholdene er i følge rapporten karakterisert som gode, og det er observert svært få sprekker der målingene er utført. Hullengden 0 - 9 m som består av hvit kalkstein hadde en RQD-verdi på 81, noe som er betegnet som god bergmassekvalitet SINTEF, 1997b.

##### Bergmekaniske egenskaper

Fra de utborde bergprøvene fra målehullet er det utført laboratorietester for å kunne estimere bergmekaniske egenskaper. Disse er listet i Tabell 3

Bergart	E-modul [GPa]	Poissons- forfold	Trykk- fasthet [MPa]	Brudd- vinkel [°]	Strekk- fasthet [MPa]	Lyd- hastighet [m/s]	Romvekt [kg/m <sup>3</sup> ]
Kalkstein	58,6	0,30	34,9	19	3,0	5500	2750
Dioritt	36,9	0,15	112,1	4	*	5027	3075

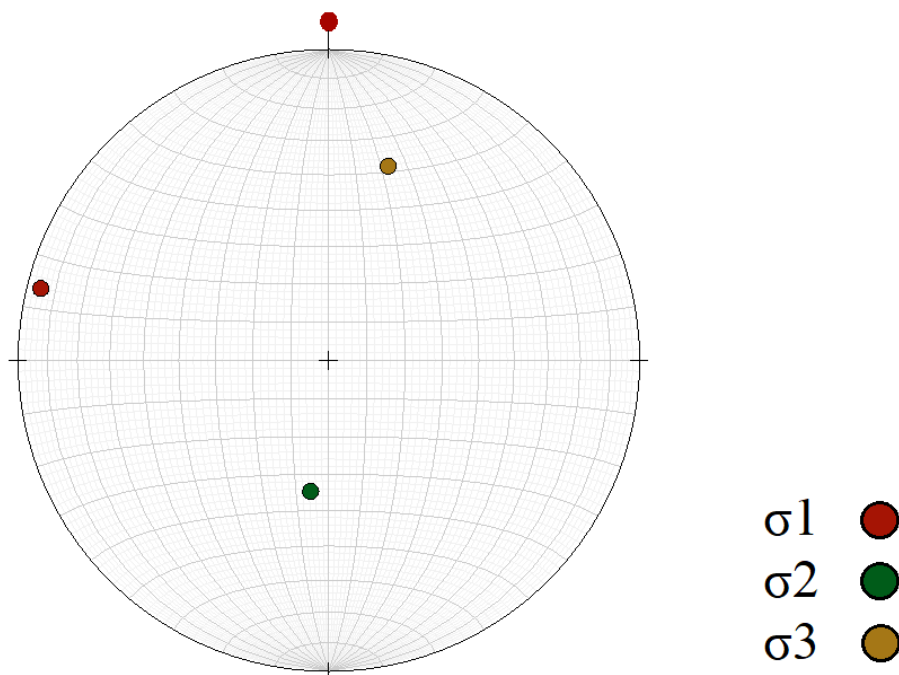
Tabell 3: \* står for ikke bestemt. Enheten for spenning er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa og GPa (Giga Pascal) =  $10^9$  Pa. Tabellen er hentet fra SINTEF, 1997b.

### 3D bergspenningsmålinger

Tabell 6 viser resultatene fra 3D-spenningsmålingene,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  og  $\sigma_3$ , mens  $\sigma_v$  og  $\sigma_H$  er den teoretiske vertikale- og horisontalspenningen som er funnet fra overdekningen på målestedet ved bruk av Formel (1) og Formel (2) i Avsnitt 2.1.1. Resultatet av hovedspenningene er presentert i et stereoplott i Figur 4.3.

	Spenning [MPa]	Orientering [°]	Fall [°]
$\sigma_1$	7,4	284,6	4,8
$\sigma_2$	3,6	187,8	54,5
$\sigma_3$	2,7	17,9	35,1
$\sigma_v$	1,6	*	-90
$\sigma_H$	0,69	*	0

Tabell 4: \* står for ikke bestemt. Enheten for spenning er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa.  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  og  $\sigma_3$  er hovedspenninger. Avviket fra målingene er ikke nevnt i rapporten.  $\sigma_v$  og  $\sigma_H$  er den teoretiske vertikale- og horisontalspenningen. Orientering forteller om hovedspenningens orientering fra nord. Fall er vinkelen mellom hovedspenningen og horisontalplanet. Tabellen er hentet fra SINTEF, 1997b.



Figur 4.3: Stereoplott av de tre hovedspenningene. Den røde pinnen på toppen av sirkelen representerer nord. Verdiene er hentet fra SINTEF, 1997b og stereoplottet er laget i Visible Geology.

### Vurdering av spenningsforhold

$\sigma_2$  har et fall på  $54,5^\circ$  som er relativt steil og kan sammenlignes med  $\sigma_v$ . Den målte  $\sigma_2$  er betydelig høyere, 1,6 ganger høyere enn det den teoretiske  $\sigma_v$  skulle tilsi. Dagbruddet og målestedet ligger i bunnen av en dalside. Det blir derfor naturlig at dalsiden vil påvirke og forstyrre måleresultatene. Dalsideeffekten er også blitt observert ved andre målelokaliteter (SINTEF, 1997b).

Ved å sammenligne den teoretiske horisontalspenningen,  $\sigma_H$  med både  $\sigma_1$  og  $\sigma_3$ , er den teoretiske verdien vesentlig mindre. Dette kan være et resultat av tektonikk og strukturbetinget. Spenningsbildet i Nordland tilsier store horisontalespenninger som skyldes tektonikk (Fejerskov mfl., 2000). Målingene utført på dette området tilsier det samme.

#### 4.2.2 Forbergskog

##### Målestedet

Målingene er utført på Forbergskog i en tunnel som er drevet fra Akselberg mot Forbergskogs hengside av forekomsten. Fra befaring i tunnelen er det observert svakhetssoner og sprekker i området nær målingene er tatt. Målingene er utført med et overdekk på ca 85 - 90 m. I likhet med Engadalen er målingene utført med tredimensjonale måleceller i et horisontalt hull. Det ble i alt utført 9 enkeltmålinger med hulldybde fra 11,0 m til 15,0 m.

##### Bergmekaniske egenskaper

Fra de utborede kjerneprøvene fra målehullene er det bestemt bergmassens mekaniske egenskaper gjennom laboratorietester. Mildere verdier er presentert i Tabell 5.

Bergart	E-modul [GPa]	Poissons- forfold	Trykk- fasthet [MPa]	Brudd- vinkel [°]	Lyd- hastighet [m/s]	Romvekt [kg/m <sup>3</sup> ]
Kalkstein	61	0,30	43,5	17	5578	2730

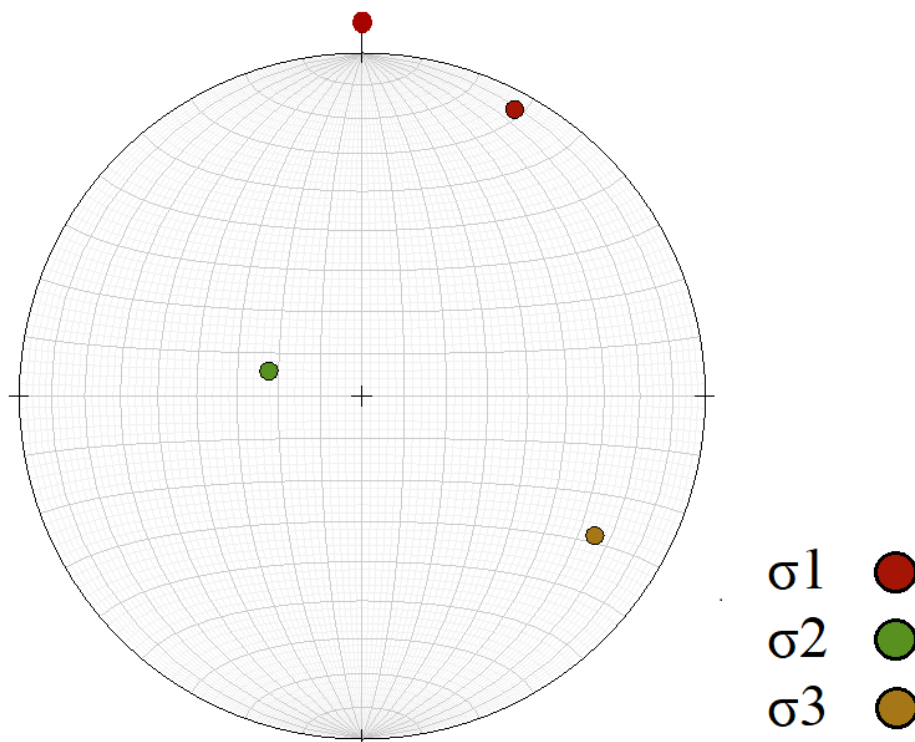
Tabell 5: Enheten for spenning er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa og GPa (Giga Pascal) =  $10^9$  Pa. Tabellen er hentet fra SINTEF, 1999.

### 3D bergspenningsmålinger

Tabell 6 viser resultatene fra 3D-spenningsmålingene,  $\sigma_1, \sigma_2$  og  $\sigma_3$ , mens  $\sigma_v$  og  $\sigma_H$  er den teoretiske vertikalspenningen og horisontalspenningen som er funnet fra overdekningen på målestedet ved bruk av Formel (1) og Formel (2) i Avsnitt 2.1.1. Resultatet av hovedspenningene er presentert i et stereoplott i Figur 4.4.

	Spenning [MPa]	Orientering [°]	Fall [°]
$\sigma_1$	$10 \pm 2,6$	28,3	5,6
$\sigma_2$	$5,2 \pm 2,3$	284,8	67,3
$\sigma_3$	$3,6 \pm 2,8$	120,6	21,9
$\sigma_v$	2,4	*	-90
$\sigma_H$	1,0	*	0

Tabell 6: \* står for ikke bestemt. Enheten for spenning er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa.  $\sigma_1, \sigma_2$  og  $\sigma_3$  er hovedspenninger, mens  $\sigma_v$  og  $\sigma_H$  er den teoretiske vertikalspenningen og horisontalspenningen. Orientering forteller om hovedspenningens orientering fra nord. Fall er vinkelen mellom hovedspenningen og horisontalplanet. Tabellen er hentet fra SINTEF, 1997b.



Figur 4.4: Stereoplott av de tre hovedspenningene. Den røde pinnen på toppen av sirkelen representerer nord. Verdiene er hentet fra SINTEF, 1999 og stereoplottet er laget i Visible Geology.

### Vurdering av spenningsforhold

$\sigma_2$  har et fall på  $67,3^\circ$  som er relativt steil og kan sammenlignes med  $\sigma_v$ . Den målte  $\sigma_2$  er mye høyere enn det den teoretiske  $\sigma_v$  skulle tilsi (SINTEF, 1999). Ved å sammenligne den teoretiske horisontalspenningen,  $\sigma_H$  med både  $\sigma_1$  og  $\sigma_3$ , er den teoretiske verdien mye mindre. En størrelsesorden på nesten 10 sammenlignet med den største horisontalspenning. Spenningsbildet i Nordland tilsier store horisontalspenninger som skyldes tektonikk (Fejerskov mfl., 2000). Målingene som er utført på dette området tilsier det samme.

#### 4.2.3 Akselberg

##### Målestedet

Det er utført målinger på to ulike lokaliteter på Akselberg, disse er merket i Figur 4.2. Resultatene fra målingene avviker veldig fra hverandre. Dette gjelder spesielt 2D som er gjort i 2007. I rapporten konkluderes det med at dette skyldes lokale svakhetssoner. Det velges derfor å se bort i fra disse målingene videre i denne oppgaven. Målingene er utført med overdekke på 85 - 90 m. I likhet med Engadalen og Forbergskog er målingene utført med tredimensjonale måleceller.

##### Bergmekaniske egenskaper

På de utborede kjerneprøvene fra målehullene er det bestemt bergmassens mekaniske egenskaper gjennom laborietester. Disse verdiene er hentet fra SINTEF testrapport: E-modul, Poissonsforhold, enakset trykkfasthet (SINTEF, 1997a og SINTEF rapport: Bergspenningsmålinger ved Akselberg (SINTEF, 2000). Mildere verdier med avviket er presentert i Tabell 7.

Bergart	E-modul [GPa]	Poissons- forhold	Trykk- fasthet [MPa]	Strekk- fasthet [MPa]	Brudd- vinkel [°]	Lyd- hastighet [m/s]	Romvekt [kg/m <sup>3</sup> ]
Gneis	23,7	0,10	102,2	6,5	13,5	3672	2962
Båndetkalkstein	46,2	0,30	56,0	3,8	20,0	4516	2868
Flekketkalkstein	61,6	0,30	64,1	3,5	21,3	5362	2854
Uren kalkstein	27,8	0,20	67,5	3,7	17,3	3737	2886

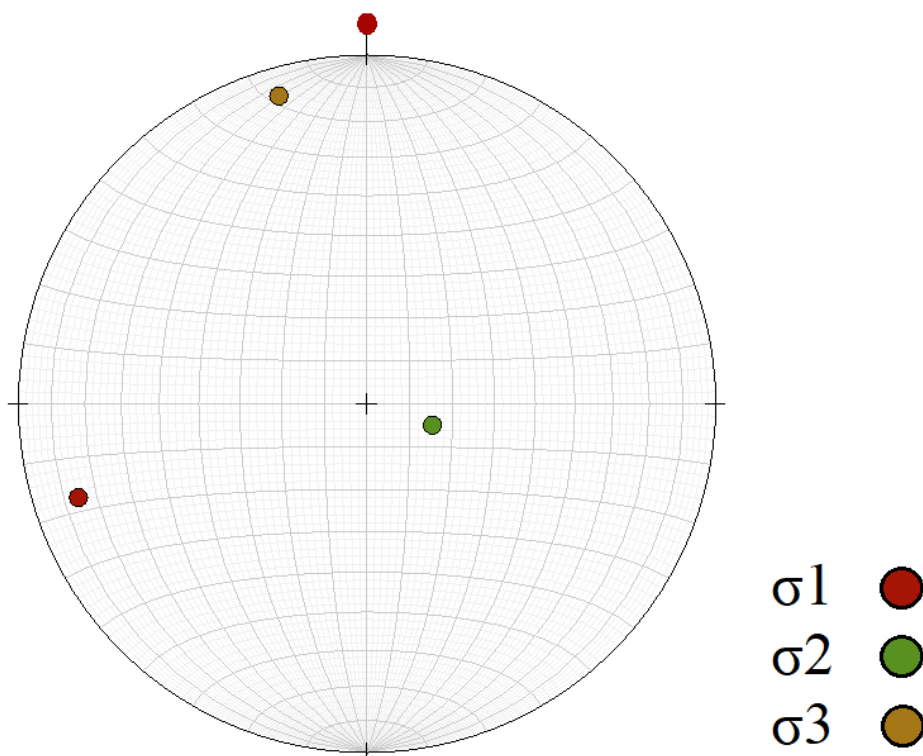
Tabell 7: Enheten for spenning er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa og GPa (Giga Pascal) =  $10^9$  Pa. Tabellen er hentet fra SINTEF, 1999.

### 3D bergspenningsmålinger

Tabell 8 viser resultatene fra 3D-spenningsmålingene,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  og  $\sigma_3$ , mens  $\sigma_v$  og  $\sigma_H$  er den teoretiske vertikalspenningen og horisontalspenningen som er funnet fra overdekningen på målestedet ved bruk av Formel (1) og Formel (2) i Avsnitt 2.1.1. Resultatet av hovedspenningene er presentert i et stereoplott i Figur 4.5.

	Spenning [MPa]	Orientering [°]	Fall [°]
$\sigma_1$	$14,6 \pm 3,6$	252	14
$\sigma_2$	$11,3 \pm 3,5$	108	74
$\sigma_3$	$9,6 \pm 3,3$	344	9
$\sigma_v$	2,5	*	-90
$\sigma_H$	1,0	*	0

Tabell 8: \* står for ikke bestemt. Enheten for spenning er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa.  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  og  $\sigma_3$  er hovedspenninger, mens  $\sigma_v$  og  $\sigma_H$  er den teoretiske vertikalspenningen og horisontalspenningen. Orientering forteller om hovedspenningens orientering fra nord. Fall er vinkelen mellom hovedspenningen og horisontalplanet. Tabellen er hentet fra SINTEF, 1997a.



Figur 4.5: Stereoplott av de tre hovedspenningene. Den røde pinnen på toppen av sirkelen representerer nord. Verdiene er hentet fra SINTEF, 1997a og stereoplottet er laget i Visible Geology.

**Vurdering av spenningsforhold**

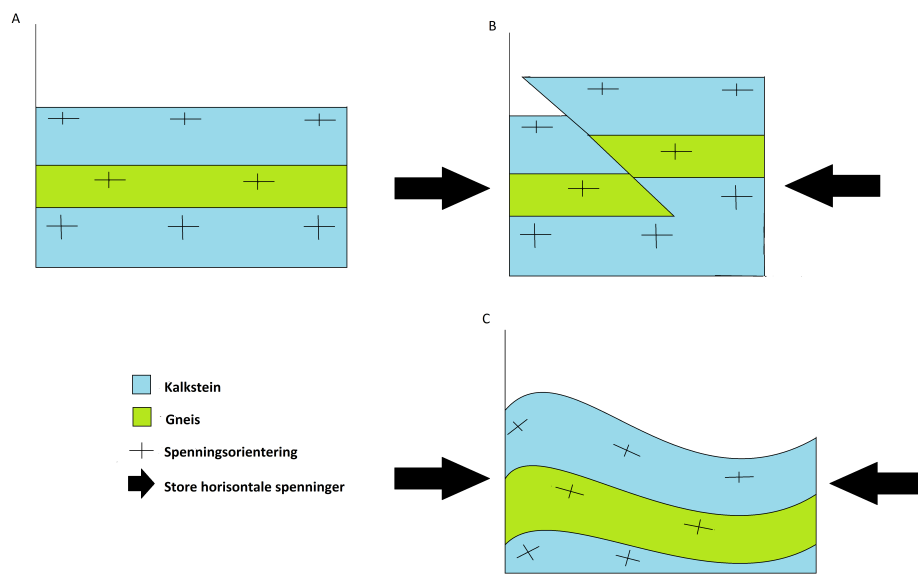
$\sigma_2$  har et fall på  $74^\circ$  som kan tolkes som relativt steil og kan sammenlignes med  $\sigma_v$ . Den målte  $\sigma_2$  er flere ganger høyere enn det den teoretiske  $\sigma_v$  skulle tilsi (SINTEF, 1997a) og (Grøv og Holmøy, 2000). Videre sammenligning av den teoretiske horisontalspenningen,  $\sigma_H$  med både  $\sigma_1$  og  $\sigma_3$ , er de målte verdiene flere ganger, altså neste 14 ganger sammenlignet med den største horisontalspenning. Spenningsbildet i Nordland tilsier store horisontalespenninger som skyldes tektonikk (Fejerskov mfl., 2000). Målingene som er utført på dette området tilsier det samme.



### 4.3 Bergspenningsanalyse

#### Folding

Fra strukturgeologiske analysen utført i Avsnitt 3.4 kommer det frem at både Hillstadjellkarbonatene og nordlige Sauskarbonatene er kraftig foldet. Effekten av foldningen kompliserer både spenningsregimet og spenningsorienteringen. Det tolkes at disse kan variere lokalt, og dette ved små avstander.



Figur 4.6: Figur A illustrer plane lag som er parallelt med horisontalplanet før det ble utsatt for store horisontale spenninger. Ved påføring av store horisontale spenninger kan de ende med plastisk deformasjon (B) eller sprø deformasjon (C). Figuren er laget i Adobe Illustrator.

Figur 4.6 illustrerer sammenhengen mellom store horisontale spenninger og deformasjonen dette kan medføre. A illustrer plane lag som er parallelt med horisontalplanet før det blir utsatt for store horisontale spenninger. Ved påføring av store horisontale spenninger kan det ende med utfall B eller C avhengig av bergartenes egenskaper. Utfall B representerer sprø bergarter. Disse bergartene har som regel høy elastisitetsmodul og gir ustabil deformasjon. Bergarter som granitt, basalt og gneis er gode eksempler på dette. Dette er beskrevet i Avsnitt 2.1.4. Når spenningsene er så store at det oppstår brudd, vil ikke spenningsorienteringen i dette tilfelle endre så mye. Utfall C oppstår når bergartene er duktile. Disse bergartene gir plastisk deformasjon ved store horisontale spenninger. Marmor, kalkstein og sandsteiner er eksempler på dette, og disse kjennetegnes ved relativt lavere elastisitetsmodul. Plastisk deformasjon resulterer med at spenningsorienteringen innad lagene blir orientert tilnærmet parallelt med foldingen. Dette er illustrert i Figur 4.6.

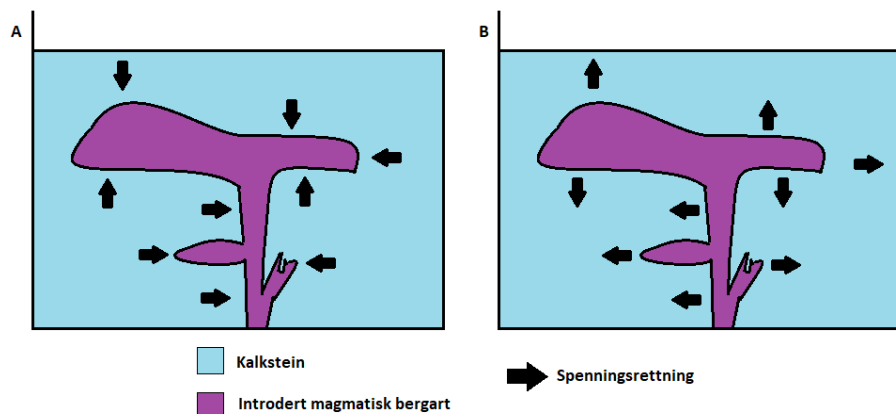
Fra dette kan det tenkes at spenningsorienteringen og regimet innad nordlige Sauskarbonatene og Hillstadjellkarbonatene trolig vil variere lokalt. Som regel er den største hovedspenningen orientert normalt på foldeaksen (Rowland mfl., 2007) og (Nilsen, 2016). Fra Sulindianhendelsen nevnt i Avsnitt 3.1.1 nevnes det østvest-foldning av den baltiske siden, noe som kan gjelde for Akselberg. Fra Figur 3.12 (dersom det tolkes at lagene her er foldet) og fra Figur 3.6 tolkes det at den største hovedspenningen da foldingen inntraff er tilnærmet  $75 - 85^\circ$  fra nord.

### **Plutoner i Velfjordområdet**

Fra Figur 3.9 kommer det frem at Sausfjell plutonet er noe foldet. Siden vertsbergarten i utgangspunktet var foldet da magmaen introderte, kan dette tolkes som området var påvirket av sterke lokale horisontalspenninger både før og etter introduksjonen fant sted.

Innstrømming av store mengder magma med høyt trykk og temperatur resulterte med utvidelse av magmakammerene og kontaktsmelting av vertsbergartene ved kontaktsonen. Dette vil påvirke spenningsregimet og spenningsorienteringen ikke bare innad plutonet, men også innad vertsbergartene nær kontaktsonen. Denne spenningsomlagringen kan merkes desto nærmere en kommer grensen til plutonet. Dette gjelder nordvest, gjennom nord og hele veien til østlige delen av Sausfjell plutonet, der plutonet grenser til nordlige Sauskarbonatene. Det er kun gjort en strukturgeologisk analyse av Sausfjell pluton og ikke av Akset-Drevli- og Hillstadjell pluton, som befinner seg mye nærmere Akselberg. Det kan ikke tolkes direkte at det samme gjelder ved Akset-Drevli- og Hillstadjell pluton, men det kan tenkes at noe tilsvarende gjelder for disse desto nærmere en kommer kontaktsonen ved disse plutonene (se Figur 3.8).

### Forholdet mellom elastisitetsmodul

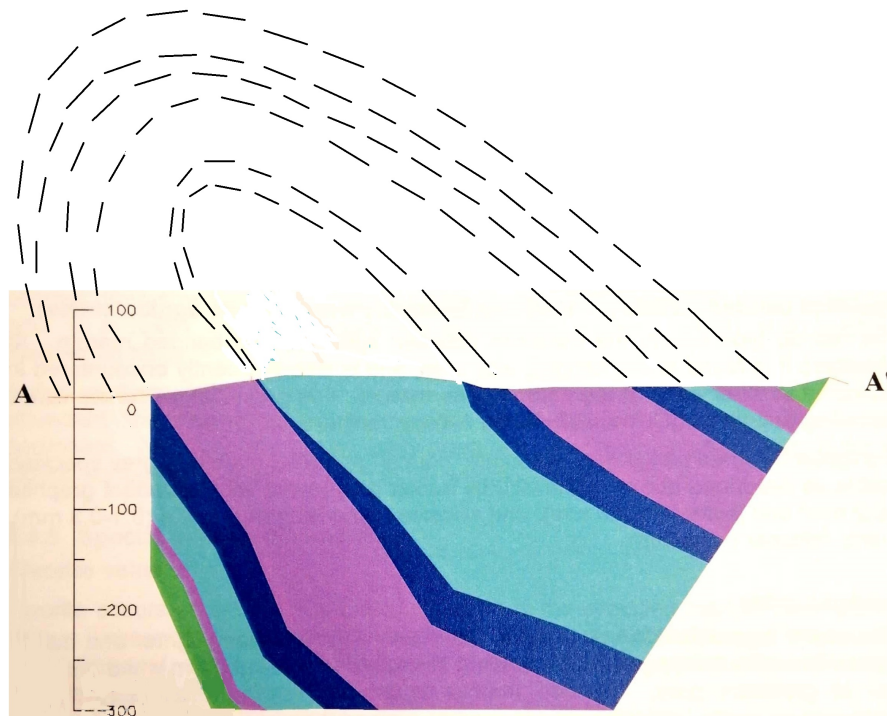


Figur 4.7: Spenningen absorberes innad forskjellige bergarter avhengig av forholdet mellom elastisitetsmodulen mellom nabobergarterne. Bergarter med relativt høyere elastisitetsmodul har en tendens til å absorbere noe av spenningen fra nabobergarten med lavere elastisitetsmodul. A illustrer kalkstein (lyseblå) med lavere E-modul enn magmatiske bergarten (lilla), dermed absorberes noe av bergspenningen av magmatiske bergarten. Det motsatte er illustrert i B. Figuren er laget i Paint

Den duktile kalksteinsforekomsten i Akselberg og Forbergskog er omringet av bergarter som gabbro og granitter som er av relativt høyere elastisitetsmodul. Akset-Drevli plutonet som er en intrusjon bestående av gabbro og dioritt, der gabbro er av relativt høy elastisitetsmodul og dioritt som kan være det. I dette tilfelle vil noe av den påførte spenningen fra de duktile kalksteinsforekomstene absorberes av intrusjonen.

Ved å sammenligne elastisitetsmodulen til gneisen og kalksteinen i Akselberg, se Tabell 8, har kalksteinen i gjennomsnitt høyere elastisitetsmodul enn gneisen i området. Gjentatte målinger i området viser at både horisontal- og vertikalspenningen i kalksteinsforekomsten i området er flere ordens høyere enn det den teoretisk tilsier. Mulig dette kommer av arching effekten som er nevnt i Avsnitt 2.1.1. Stivhetsforskjellen mellom gneisen og kalksteinen i området gjør at noe av spenningen fra kalksteinen absorberes av den stivere gneisen, noe som påvirker det lokale spenningsregimet.

## Erosjon



*Figur 4.8: Ved å tolke snitt A-A' fra Figur 3.6 som foldede lag, kan det også tenkes at det forekommer residualspenninger grunnet smelting av isbreer og erosjon av overdekket. Stiplede linjene illustrerer bergmasser som er erodert bort. Figuren er hentet fra Watne, 2001 og modifisert i Adobe Illustrater.*

I Avsnitt 3.1.3 nevnes erosjon i form av elver, bekker og massive isbreer. Akselbergområdet er omringet av en rekke fjorder som trolig stammer fra isbreerosjon. Fra Figur 4.8 som er et vertikalsnitt A-A' fra Figur 3.6, kan det tolkes at Akselbergområdet er foldet og tiltet. De stiplede linjene er bergmasser som er erodert bort, hovedsakelig av isbreer. Fra Avsnitt 2.1.1 kan det tenkes at området her består av residualspenninger, altså bergspenninger som er låst fast i berget. Dette kan komme av massive isbreer som brått er blitt smeltet vekk og overdekket som er erodert bort. Dette kan påvirke det lokale spenningsregimet.

### Lineasjonretning

Spenningsregimet i Nordland kjennetegnes ved høyere spenningsforhold enn det den teoretisk tilsier. Årsaken til dette er blant annet tektonikk og transportering av De kaledonske skyvedekkene (Fejerskov mfl., 2000). Som nevnt i Avsnitt 3.1.4 er De Kaledonske skyvedekkene blitt transportert fra hav- og kystområdet i vest og innover kontinentet i øst. Den eksakte retningen på bevegelsen er ikke lett å finne. Dette kan varieres lokalt, men fra Figur 3.3 kan det tenkes transportretningen i Nordland varieres. Enkelte steder er retningen  $75 - 85^\circ$ , mens andre steder  $35 - 45^\circ$  fra Nord (grovt estimert).

Lineasjonsretningen i Sausfjell plutonet og bergartene rundt har en stor variasjon. Den gjennomsnittlige retningen innad selve plutonet ligger på  $220 - 235^\circ$  fra nord, men dette varieres langs kontaktsonen. I nord og nordøst for plutonet er den gjennomsnittlige retningen  $110 - 120^\circ$ , mens i sørøst er retningen  $20 - 35^\circ$  i forhold til nord. Alderen på plutonet og bergartene rundt er forskjellig, og det er mulig at transportretningen har variert med tiden.

Lineasjonsretningen kan fortelle om transportretningen til Den kaledonske fjellkjeden. Som oftest er hovedspenningen orientert parallelt eller normalt på transportretningen. Dette er nevnt i både Avsnitt 3.1.4 og Avsnitt 2.1.1. Siden avstanden mellom Sausfjell plutonet og Akselberg er så stor og variasjonen på lineasjonsretningen i plutonet er også stor. Er det vanskelig å se en sammenheng mellom lineasjonsstrukturen og retningen på hovedspenningene.

### Topografiske effekter

Akselbergområdet er preget av dalsenkinger fra flere kanter. Det er høydedrag fra 500 m opp mot 900 m. Det er derfor naturlig å tenke at bergspenningsforholdene i dagen indikerer at bergmassene har vært påvirket av de omkringliggende overdekningene og dalsidene. Dette gjør at spenningsregimet og orienteringen vil variere langs dalsiden. Fra tidligere erfaringer viser slike dalsenkinger som denne at spenningskonsentrasjoner kan oppstå, og konsentrasjonen øker lenger ned på dalbunnen (Grøv og Holmøy, 2000). Fra topografien i området kan det forventes at spenningen orienteres parallelt og normalt langs dalsiden.

## Diskusjon

Det stilles kritisk til målingene som er utført på de forskjellige anleggene og hvor troverdig disse er. I rapportene kommer det frem at det er en del feilmålinger og flere av målingene er forstyrret og usikre. Dette gjør det vanskeligere å tolke riktig regional orientering og forhold på hovedspenningene. Fra forståelsen av den geologiske historien, strukturgeologiske analysen og bergspenningsanalysen som er utført i Akselbergområdet, kommer det fram at bergspenningenes orientering og forhold har en variasjon. Årsaken til dette er komplisert, og en rekke ulike faktorer påvirker dette.

Bergspenningene i Nordland er kjent for høye spenningsforhold enn det den teoretiske tilsier. Dette kommer av tektonikk og transportering av De kaledonskeskyvedekkenene. Akselbergområdet er omringet av fjorder og daler noe som trolig kommer fra isbreerosjon. En kombinasjon av erosjon av overdekket og brå isbresmelting, gjør at det eksisterer residualspenninger i bergmassene. Inhomogenitet og arching-effekt bidrar til endring i det naturlige spenningsbildet. Dette gjelder spesielt mellom bergarter med forskjellige bergmekaniske egenskaper som stivhet. Det naturlige spenningsbildet endrer seg i nærheten av plutonene i Akselbergområdet. Dette gjelder desto nærmere en kommer kontaktsonen mellom plutonet og vertsbergarten. Fra den strukturgeologiske analysen utført på Akselberg kommer det fram at største hovedspenningen er orientert normalt på foldeasken, som er  $75 - 85^\circ$  fra nord. Dette samsvarer ikke med resultatene fra målingene som er utført. Bergspenningsmålingene er utført på relativt lavt dyp, 85 - 90 m. Som nevnt tidligere er Akselbergområdet omringet av fjorder og daler. Ved relativt lave dypder vil spenningene bli påvirket av dette, dalsideeffekten, og blir orientert parallelt og normalt langs dalsiden. Samtidig vil det oppstå spenningskonsentrasjoner langs dalsiden, der konsentrasjonen øker mot dalbunnen. Ved små dypder vil dalsideeffekten ha større påvirkning på spenningsorienteringen og spenningsregimet. Dette og de overnevnte faktorene til sammen gjør at bergspenningsmålingene er høyere enn det teoretiske tilsier, men også stor variasjon på de forskjellige anleggene. Det kan også tenkes at spenningsorientering og regimet vil variere innad de anleggene.

For empiriske- og analytiske beregninger og numerisk modellering velges det derfor bergspenninger og andre bergmekaniske egenskaper fra Akselberg som inngangsparametere. Den teoretiske og in situ-målte vertikalspenning,  $\sigma_v$  avviker fra hverandre. Her er den in situ-målte bergspenningen tilnærmet 4,5 ganger høyere enn den teoretiske. Det var ønskelig å utføre beregninger og modelleringer med varierende vertikalspenning fra 5 MPa (dobbelte av teoretisk beregnet vertikalspenning) opptil 11,3 MPa (in situ-målte vertikalspenning). Grunnet begrensing av tid, er det til slutt valgt 8 MPa som vertikalspenning. Dette er en nedjustert verdi fra in situ-målte spenninger

og oppjustert verdi av den teoretiske.

## 5 Design av bergrom

### 5.1 Analyse av stabilitetsforhold, sprekker og svakhetssoner

#### 5.1.1 Stabilitetsforhold

Det er utført en analyse på stabilitetsproblemer som kan oppstå under utbyggingen av Akselbergs fremtidige underjordsuttak. Analysen er basert rapport på "Akselberg dagbrudd – vurdering av stabilitetsforhold basert på befaring 30. juni 2008" (Nilsen, 2003) og "Vurdering av stabilitetsforhold i Akselberg dagbrudd basert på befaring 19. september 2003" (Nilsen, 2008).

Fra rapportene kommer det frem at sprekker langs bergartsfoliasjon har utvilsomt størst betydning for stabiliteten i dagbruddet. Sprekkene langs foliasjonen er orientert langs strøkretningen tilnærmet N - S, N160 - 185°Ø. Dette er tilnærmet parallelt med de lengste veggene i dagbruddet. Grunnet foldning er fallvinkelen varierende, men den har et gjennomsnittlig fall på 30 - 50°Ø. Basert på erfaringer er den kritiske vinkelen for utglidning blitt estimert til 40 - 45°. Foliasjonssprekkene er for det meste undulerende og har ganger og belegg av grafitt som bidrar til å svekke styrken til forekomsten. Dette bidrar til å redusere den kritiske vinkelen ned til 40° i disse områdene (Nilsen, 2003) og Nilsen, 2008.

Foliasjonssprekkes retning kombinert med sprekke utgjør fare for plane utglidninger langs den vestre veggen av dagbruddet. Enkelte steder eksisterer også steile sprekker på tvers av foliasjonen, som sammen med foliasjonsplan gir muligheter for kileformede utglidninger. På østre siden av dagbruddet er foliasjonene stabilitetsmessig gunstig orientert med fall inn i veggen. Det eksisterer enkelte tverrsprekker med strøk som er tilnærmet parallelt med veggen og fall steilt innover. Disse kan by på problemer lokalt i disse områdene. Nordøstre veggen av dagbruddet består av en sleppesone med leire og sprekker med middels steil fall ut mot dagbruddet. Dette bidrar til stabilitetsproblemer i dette området. Utenom disse er det observert fåtall ugunstig orientering på sprekker som kan gi lokale stabilitetsproblemer (Nilsen, 2008).

Hovedinntrykket av dagbruddet er at bergmassene generelt er av middels til meget god kvalitet og byr på mindre lokale problemer knyttet til stabilitet. De områdene av dagbruddet der endelig vegg er etablert og det ikke har oppstått utglidninger, var det generelle inntrykket god til meget god kontursprengning. God kontursprengning er av stor betydning for stabiliteten (Nilsen, 2008).



## **Anbefalinger**

Resultatet av foliasjonssprekkene med middels steilt fall mot øst er vestveggen den delen av Akselberg som har størst problemer knyttet til stabilitet. Underkuttete partier har ved flere tilfeller glidd ut under og etter spreningsarbeid. Det kan tenkes at tilsvarende problem ville kunne oppstå ved underjordsanlegget og sikring mot utglidning må vurderes. Ved tilfeller der underkutting er større enn 35 - 40° kan det tenkes at nedstrossing er et godt alternativ. For mer problematiske partier dypere i bruddet og der sidekanten ikke er avløst anbefales boltsikring som er 4 - 6 m lange (Nilsen, 2008).

Selv om østreveggen er gunstig orientert i forhold til foliasjonssprekkene kan det oppstå stabilitetsproblemer. Det anbefaler boltsikring på underkuttende tverrsprekker som måtte bli truffet. Det er også ikke ønskelig med alt for bratte veggvinkler. Det er ønskelig at dette begrenses til god margin i forhold til den kritiske vinkelen. (Nilsen, 2008). Det partiet som består av slepper nordøst i dagbruddet. Det anbefales nedstrossing og utflating av toppen og forankring av det gjenværende partiet. Grunnet det partiet er stort og oppknust er det anbefalt boltsikring (Nilsen, 2008).

Tilsvarende stabilitetsproblemer knyttet til veggen i nordøst, vest og øst av dagbruddet kan forekomme i underjordgruven. Løsningene som er foreslått av Bjørn Nilsen kan vurderes dersom dette problemet skulle oppstå under utgraving av underjordsgruven.

### **5.1.2 Kartlegging av sprekker og svakhetssoner**

Det er utført strøk og fallmålinger på sprekker og svakhetssoner på dagbruddet på Akselberg. Dette er utført av Trond Watne. Målingene er utført med Kompass Silva 15TD-CL, 360°/90°. Her benyttes det høyrehåndsregel med fall til høyre for strøketretning. Resultatene er hentet fra Rapport - Sprekkartlegging Akselberg dagbrudd (Nilsen, 2018). Målingene er utført på alle fire vegger av dagbruddet. Fra målingene konkluderes det følgende;

## **Nordveggen**

I alt er det påvist fire sprekesett på nordveggen, der tre av disse dominerer.

1. Strøk N - NV med tilnærmet steilt fall mot Ø - SØ, 60 - 90°. Sprekkene er fra plane til undulerende i hovedsak ru sprekker. Avstanden på sprekke varierer lokalt fra 0,1 - 1 m til 1 - 5 m. Det eksisterer også noen få større sprekker som tilhører dette sprekesystemet. Disse sprekke er fylt med sekundær utfelt kalkspat.
2. Strøk NV, tilnærmet steilt fall mot NØ, 80 - 90°. Dette sprekesettet er orientert tilnærmet parallelt bruddveggen. Dette gjør at det er vanskelig å vurdere avstanden, men dette antas å være 1 - 3 m. Grunnet dette er det mulig å tenke at dette sprekke er underrepresentert i sprekkrosen i Figur 5.3.
3. Strøk V - NV med slakt fall mot N - NØ, 10 - 30°. Sprekkene varierer fra plane til undulerende og med noen glatte sprekker. Sprekkene er tilnærmet parallelt med bruddveggen, derfor trolig underrepresentert i Figur 5.3. Det antas at sprekkavstanden er 1 - 5 m.
4. Strøk Ø - SØ med tilnærmet steilt fall mot S - SV, 70 - 80°. I likhet med sprekesett 2 og 3 er sprekesettet orientert tilnærmet parallelt til bruddveggen og derfor kan være underrepresentert i målingene. Mulig sprekkens orientering er påvirket av salver.

## **Vestveggen nivå 30**

Grunnet foliasjon er det lokale variasjoner på sprekkbildet. Dette kan bli funnet fra nord-sør i syd til øst-vest i nord.

1. Store undulerende plan NNØ - SSV med steilt fall mot ØSØ
2. Foliasjonssprekker Ø - V med fall mot N. Dette gjelder for nordlige del av vestveggen.
3. Sprekke NV - SØ med middels steilt fall mot NØ

## **Vestveggen nivå 15**

Foliasjonssprekker med grafitt med strøk subparallelt til bruddveggen. Fallet er middelssteilt, 30 - 50° mot øst noe som ikke er gunstig. Foliasjonsplanen er fra ru til glatte, svakt undulerende og består av noe grafitt.

1. Foliasjonsplan NS som er parallelt til bruddveggen, med middels steilt fall mot Ø.

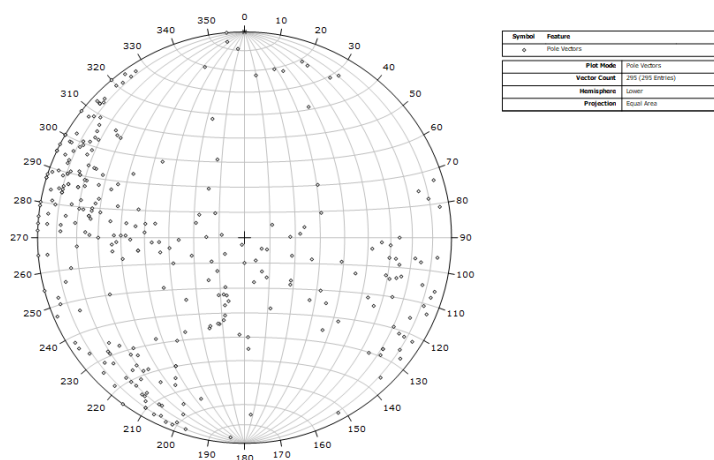
2. Subhorisontale sprekker med slakt fall mot V.
3. V/NV - Ø/SØ steile subvertikale sprekker.
4. NØ - SV sprekker med steilt fall mot SØ.

### Sydveggen nivå 15

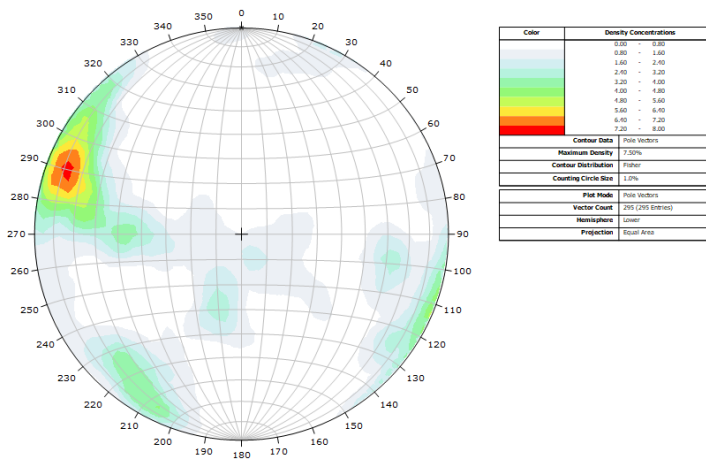
Her er foliasjonssprekkene borte i sørvestlige hjørnet. I stedet dominerer steile NS sprekker. Steile sprekker NNØ - SSV dominerer i spettet kalk i østlige delen av sydveggen. Foliasjonssprekkene er mest uttalte i vestvegg nær ligg, i båndet og til dels uren marmor. Det er mindre av disse i de mer homogene isotrope marmortypene.

### Østvegg nivå 15

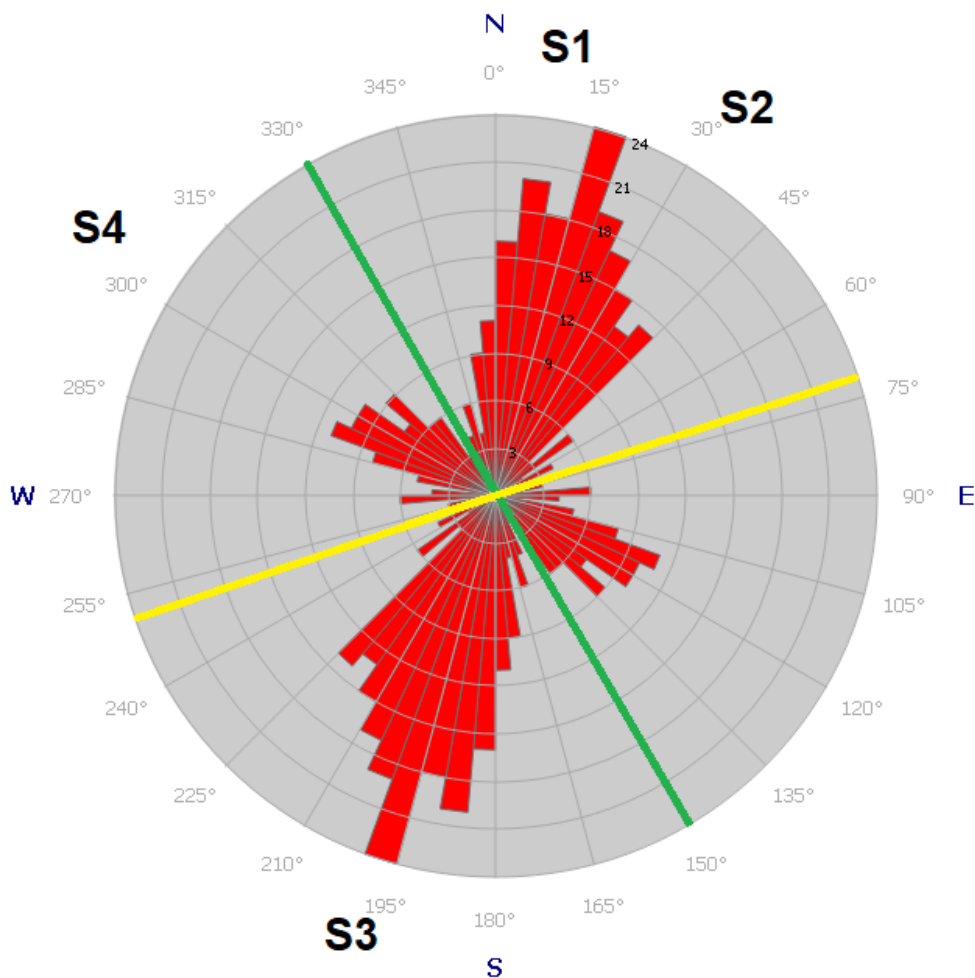
Østvegg er temmelig oppknust trolig grunnet sprenging lengst syd. Mer foliasjonssprekker i båndet- og uren kalk på hengsiden i øst, foliasjonssprekkene uryddige på grunn av folding. Dominerende steilt NNØ - SSV system, der foliasjonssprekkene er av varierende men overveiende fall mot Ø. Steile sprekker parallelt bruddvegg og flate foliasjonssprekker med slakt fall mot øst.



Figur 5.1: Stereoplot - polene til sprekker og svakhetssoner av dagbruddet på Akselberg. Målingene er hentet fra Nilsen, 2018. Stereoplottet er laget i Rock-Science2.



Figur 5.2: Stereoplott - konturer til sprekker og svakhetssoner av dagbruddet på Akselberg. Målingene er hentet fra Nilsen, 2018. Stereoplottet er laget i Rock-Science2.



Figur 5.3: Sprekkerosen er av sprekker og svakhetssoner fra dagbruddet på Akselberg. Grønne og gule linjen indikerer de mest gunstige retninger bergrommet bør orienteres med tanke på sprekker og svakhetssoner. Målingene er hentet fra Nilsen, 2018. Sprekkerosen er laget i GeoRose.

## Diskusjon

Fra målingene tolkes det at det eksisterer 4 sprekkesett, men tre av disse er dominerende. Disse tre er S1, S2 og S3. Det fjerde sprekkesettet, S4 er av liten størrelsesorden. Det velges derfor å se bort fra denne ved estimering av GSI. De tre sprekkesettene er beskrevet under;

1. S1: Målingene tilsier strøkretning mellom  $0 - 20^\circ$  og fall  $70 - 90^\circ$  mot øst. I samme sprekksystem eksisterer det sprekker med steilt fall mot vest. Sprekkavstanden varierer fra 0,2 til 2m, men enkelte steder er det observert tettere sprekkevstand som 0,2 til 0,4. Sprekkoverflaten er fra plan til ru, de enkelte steder består av belegg av kalkspat og leirlag.
2. S2: Målingene tilsier strøkretning mellom  $30 - 50^\circ$  og fall  $70 - 90^\circ$  mot øst. I samme sprekksystem eksisterer det sprekker med fall mot vest. Sprekkavstanden varierer fra 0,5 til 1m, men i det store området er det observert ingen sprekker. Sprekkoverflaten er ru med ingen fylling.
3. S3: Dette sprekksettet er tolket som kløvretningen til kalksteinen i området. Strøkretningen har et stort sprik fra  $175 - 210^\circ$  noe som trolig skyldes foliasjonen i området. Sprekkavstanden er fra 1,5 - 3 m. I noen partier er det observert fyll av grafitt i sprekkenene, men andre steder er det ingen fyll. Sprekkenene er fra undulerende til glatte.

Fra denne analysen konkluderes det med at berget består av 3 sprekkesett. Det er mulig at det oppstår stabilitetsproblemer lokalt i enkelte områder, men utenom disse er bergmassene i Akselberg generelt av middels til meget god kvalitet.

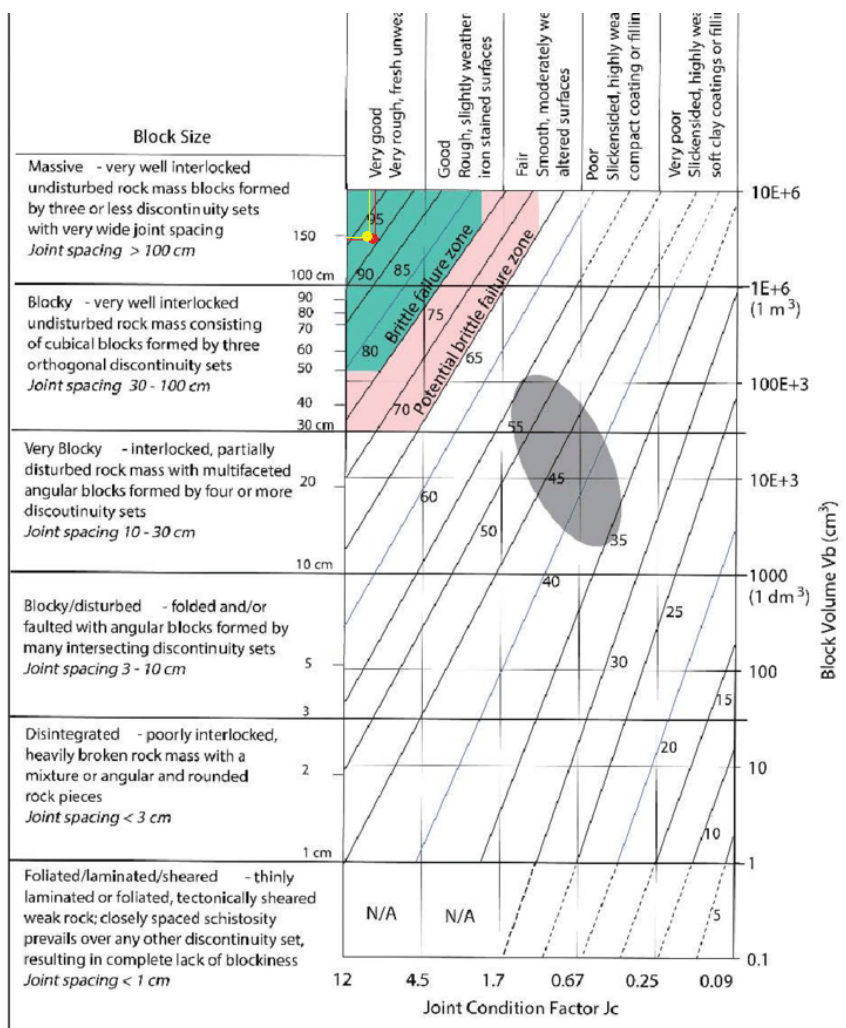
Fra sprekkekrosen i Figur 5.3 kommer det frem at to av de mest gunstigste orienteringene av bergrommet ift sprekker og svakhetssoner er som følgende; Den gunstigste av disse to illustrert i grønt, der vinkelen ligger på ca  $325 - 330^\circ$  ift nord. Den gule er også en aktuell løsning. Her er orienteringen  $245 - 250^\circ$  ift nord.

## 5.2 Skaleringen av bergmekaniske egenskaper

For kunne starte med analytiske-, empiriske beregninger og numerisk modellering, ønskes det å konvertere laboratoriemålte verdier av bergmekaniske parametere til tilnærmet in situ-verdier. Dette delkapitlet omhandler metodene som er brukt og fremgangsmåten for å utføre dette.

### 5.2.1 GSI

For å estimeringen av GSI-verdien, benyttes teorien fra Avsnitt 2.1.6 og Figur 2.6. Fra Avsnitt 5.1.1 og Avsnitt 5.1.2, kommer det frem følgende; utenom noen få lokale problemområder, består bergmassene i dagbruddet på Akselberg generelt av middels til meget god kvalitet. Berget deles inn i 3 sprekkesett. Enkelte steder er sprekkeavstanden på 0,2 - 0,4 m. Utenom disse områdene er sprekkeavstandene store fra 0,5 opptil 3m, og sprekkene er ru uten fylling. Det er enkelte steder observert sprekker som er glatte og med fylling av grafitt. GSI-verdien blir da:



Figur 5.4: Røde prikken viser estimeringen av GSI-verdien for kalkstein som er ca. 91,5 og den gule prikken for gneiss som er ca. 92. Figuren er hentet fra Marinós mfl., 2007 og modifisert i Illustrater.

Kalkstein	91,5
Gneis	92,0

Tabell 9: Estimerte GSI verdi for kalkstein og gneis i Akselberg.

### 5.2.2 Elastisitetsmodul

Fra den strukturgeologiske analysen som er utført i Avsnitt 3.4 kommer det frem at dagbruddet på Akselberg består av kalkstein og gneis. Fra Avsnitt 2.1.2 kommer det frem at in situ-verdier for elastisitetsmodulen er mindre enn målte verdier i laboratoriet. Dette kommer av at større prøver inneholder større mengde sprekker. Det er derfor ønskelig å skalere disse målingene til situ-verdier for disse bergartene. Her benyttes det Formel (4) fra Avsnitt 2.1.2. Her settes D-verdien til 0, GSI-verdien fra forrige delkapittel og  $E_i$  for kalkstein er bestemt til å være gjennomsnittsverdien for kalksteinene fra Tabell 7:

Bergart	Laborieverdi ( $E_i$ ) [GPa]	In situ-verdi ( $E_{rm}$ ) [GPa]
Kalkstein	45,2	43,7
Gneis	23,7	22,9

Tabell 10: Enheten for elastisitetsmodulen er GPa (Giga Pascal) =  $10^9$  Pa.  $E_i$  for kalkstein er bestemt til å være gjennomsnittsverdien for kalkstein fra tabell 7.

### 5.2.3 Trykk- og strekkfasthet

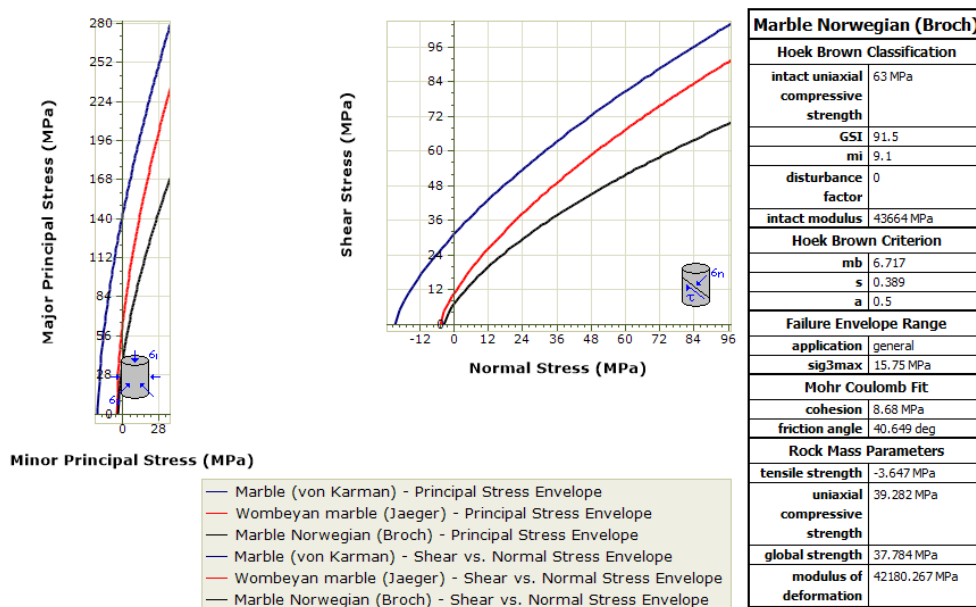
I likhet med elastisitetsmodulen vil også in situ-verdier for trykkfastheten være mindre enn laboratoriemålingene, grunnet sprekker som allerede eksisterer i bergmassen og sprekker som blir initiert av utgravingen. Det er derfor ønskelig å skalere denne verdien til in situ-verdier. Det benyttes RockData fra RockScience til å estimere in situ-verdier.

#### Kalkstein

Inputverdiene for kalksteinen for RockData og resulterende verdi av trykkfastheten er presentert i Tabel 11.

GSI	91,5
D	0
$E_{rs}$ [GPa]	43,7
$\sigma_{ci}$ [MPa]	62,5
$\sigma_{ci}$ [MPa]	3,6
$\sigma_c$ [MPa]	39,3
$\sigma_T$ [MPa]	3,6

Tabell 11: Her er; GSI: Geological strength index estimert i Avsnitt 5.2.1, D: Konturspreningsgraden,  $E_{rs}$ : In situ elastisitetmodulen estimert Avsnitt 5.2.2,  $\sigma_{ci}$ : Laboratiemålte trykkfastheten som er et gjennomsnitt av trykkfastheten til kalkstein i Tabell 7 og  $\sigma_c$ : In situ-trykkfastheten.



Figur 5.5: Inputparametere og estimering av in situ-trykkfasthet. Dette er et skjermdump av resultatet fra RockData.

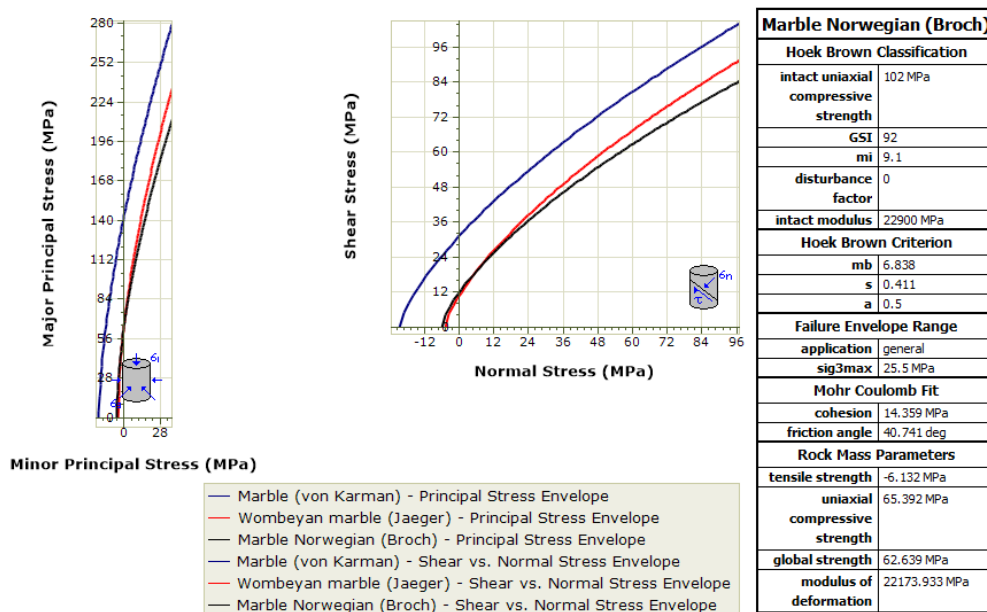


## Gneis

Inputverdiene for gneis for RockData og resulterende verdi av trykkfastheten er presentert i Tabell 12.

GSI	92,0
D	0
$E_{rs}$ [GPa]	22,9
$\sigma_{ci}$ [MPa]	102
$\sigma_{Ti}$ [MPa]	6,5
$\sigma_c$ [MPa]	65,4
$\sigma_T$ [MPa]	6,1

Tabell 12: Her er; GSI: Geological strength index estimert i Avsnitt 5.2.1, D: Konturspeningsgraden,  $E_{rs}$ : In situ elastisitetsmodulen estimert i Avsnitt 5.2.2,  $\sigma_{ci}$ : Laboratiemålte trykkfastheten som er et gjennomsnitt av trykkfastheten til gneisen i Tabell 7 og  $\sigma_c$ : In situ trykkfastheten.



Figur 5.6: Inputparametere og estimering av in situ-trykkfasthet for gneis. Dette er et skjermdump av resultatet fra RockData.

### 5.3 Empirisk verktøy - Tangentielle spenninger

Det finnes en rekke forskjellige metoder for å bestemme gode løsninger på utforming av bergrommet basert på empiriske beregningsmetoder. I denne oppgaven brukes det teori og formeler fra Avsnitt 2.3 for å estimere tangentielle spenninger. Utregningene er utført i Microsoft Excel. Det ble utført empiriske beregninger med forskjellige vertikalspenninger; 5 MPa, 6 MPa, 7 MPa, 8 MPa, 9 MPa, 9,6 MPa, 10 MPa og 11,3 MPa. Grunnet begrensning med tid er det valgt å benytte seg av vertikalspenningen på 8 MPa videre i oppgaven. Resterende utregninger er presentert i tabell og lagt til i Tillegg D.1.

#### 5.3.1 Resultat

Beregningene som er utført er presentert i Tabell 13 og Tabell 14. Her er  $\sigma_1 = \sigma_H$  og  $\sigma_2 = \sigma_h$ . For utregningene er hovedspenningene,  $\sigma_1$  og  $\sigma_2$  hentet fra Tabell 8 fra Avsnitt 4.2.3. Vertikalspenningen er bestemt til å være 8 MPa, dette er bestemt fra diskusjonen i Avsnitt 4.3. Det er gjort estimer av tangentielle spenninger i retning både største- og minste hovedspenning. Basert på dette er det vurdert mulige gode løsninger av utformingen av bergrommet for de ulike retningene.

$\sigma_{\theta_r}$	65,0	50,4	48,9	38,7	37,3	35,8	21,2	19,7	18,3
$\sigma_{\theta_w}$	1,4	-2,6	-0,2	3,8	7,0	9,4	25,4	0,6	16,6

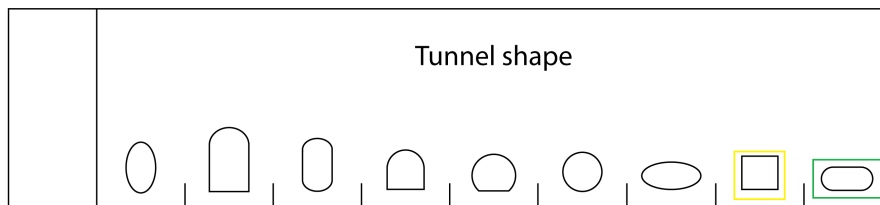
Tabell 13: Tabellen representerer utregninger i retning største horisontalspenning ( $\sigma_H/\sigma_v$ ). Her er:  $\sigma_{\theta_r}$ : tangentielle spenninger i sideveggen og  $\sigma_{\theta_w}$ : tangentielle spenninger i taket. Enheten for spenningene er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa. Beregningene er utført i Microsoft Excel.

$\sigma_{\theta_r}$	40,0	30,4	29,4	22,7	21,8	20,8	10,2	10,2	9,3
$\sigma_{\theta_w}$	6,4	2,4	4,8	8,8	12,0	14,4	30,4	5,6	21,6

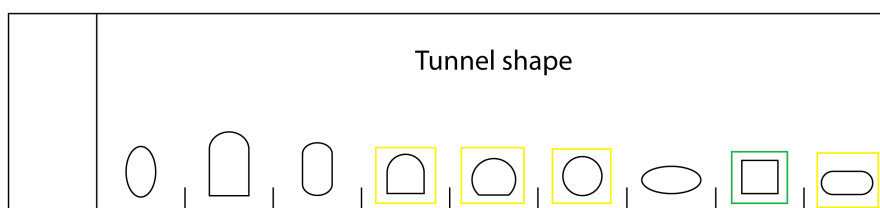
Tabell 14: Tabellen representerer utregninger i retning minste horisontalspenning ( $\sigma_h/\sigma_v$ ). Her er:  $\sigma_{\theta_r}$ : tangentielle spenninger i sideveggen og  $\sigma_{\theta_w}$ : tangentielle spenninger i taket. Enheten for spenningene er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa. Beregningene er utført i Microsoft Excel.

### 5.3.2 Diskusjon

Tangentielle spenninger er sammenlignet med in situ-trykkfasthet fra Tabell 11 fra Avsnitt 5.2.2, som er 39,3 MPa. Basert på dette velges utformingen av bergrommet. Dette er presentert i Figur D.14 (retning største horisontalspenning) og Figur 5.8 (retning minste horisontalspenning).



Figur 5.7: En god utforming av bergrommet mtp spenning er markert med grønn firkant. Utformingene som er merket med gul firkant er også en mulig løsning, men ikke optimalt. Figurene er modifisert i Paint.



Figur 5.8: En god utforming av bergrommet mtp spenning er markert med grønn firkant. Utformingene som er merket med gule firkanter er også mulige løsninger, men ikke optimalt. Figurene er modifisert i Paint.

Fra Avsnitt 2.2.2 kommer det frem at det er en fordel å orientere bergrommets lengst side parallelt med største horisontalspenning, og bergrommets korte side parallelt med minste horisontalspenning. Forholdet mellom vertikalspenningen og største horisontalspenningen er tilnærmet dobbelt, noe som betyr at bergrommet bør formes som et rektangel eller elipsoide. Forholdet mellom vertikalspenning og minste horisontalspenning er tilnærmet 1. Noe som betyr at i denne retningen bør bergrommet formes kvadratisk eller sirkulært. Resultatet fra utregningene utført i dette kapitlet tilsier det samme. Det er ønskelig at tangentielle spenninger ikke overstiger bergmassens trykkfasthet. Det er også ønskelig med positive bergspenninger i både heng og vegg, da negative bergspenninger gir økt fare for nedfall av blokker. Dette er nevnt i Avsnitt 2.2.2. Basert på dette er det kommet frem til forslag på gode utforminger av bergrommet, disse er markert med grønne og gule firkanter i Figur D.14 og Figur 5.8. Utformingene som er markert med grønne firkanter ønskes å bruke videre i numerisk analysen.

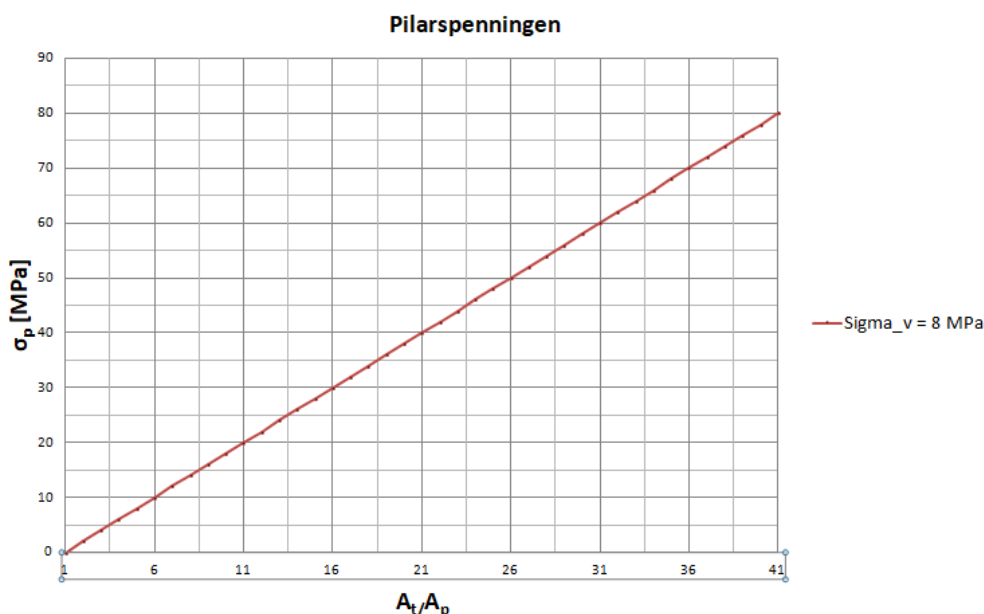
Basert på utregninger med forskjellige  $\sigma_v$ -verdier (resultatet fra disse utregningene er lagt til i Tillegg D.1), kommer det frem at løsninger på utformingen av bergrommet vil variere med vertikalspenningen. Det er derfor viktig å estimere riktig vertikalspenning.

## 5.4 Analytisk verktøy - Skattepliktigareal-metoden

For å optimalisere produksjonen er det valgt å finne best mulig kombinasjon av forholdet mellom kryssjiktet til bergkolonnen,  $A_t$  og kryssjiktet til pilaren,  $A_p$ . Her benyttes teorien fra Avsnitt 2.4. Det ble utført analytiske beregninger med forskjellige vertikalspenninger; 5 MPa, 6 MPa, 7 MPa, 8 MPa, 9 MPa, 9,6 MPa, 10 MPa og 11,3 MPa. Grunnet begrensning med tid er det valgt å benytte seg av vertikalspenningen på 8 MPa videre i oppgaven. Resterende utregninger er presentert grafisk og kan bli funnet i Tillegg D.2.

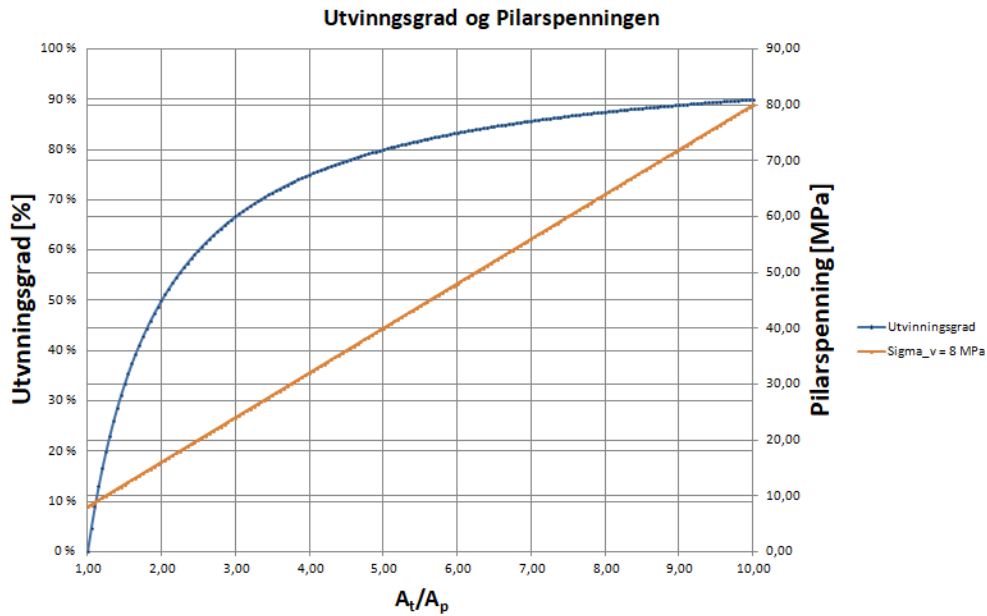
### 5.4.1 Pilarspenningen og utvinningsgraden

Ved å benytte seg av Formel (10) fra Avsnitt 2.4 er det gjort utregninger for å finne pilarspenningen,  $\sigma_p$ . Her er det valgt å finne sammenhengen mellom forholdet kryssjiktet til bergkolonnen,  $A_t$  og kryssjiktet til pilaren,  $A_p$  og pilarspenningen,  $\sigma_p$ . Utregningene er presentert grafisk i Figur 5.9



Figur 5.9: Her er  $A_t/A_p$  forholdet mellom kryssjiktet til bergkolonnen  $A_t$  og kryssjiktet til pilaren,  $A_p$  og pilarspenningen,  $\sigma_p$ . Beregningene er utført i Microsoft Excel.

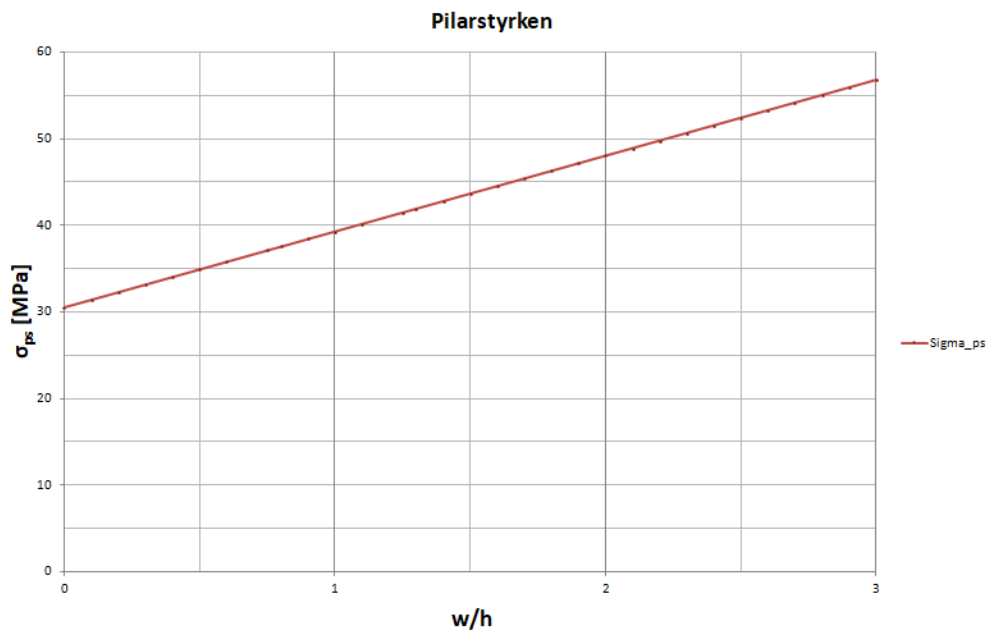
Videre benyttes Formel (11) fra Avsnitt 2.4 til å finne utvinningsgraden. Utvinningsgraden er avhengig av forholdet mellom kryssjiktet til bergkolonnen,  $A_t$  og kryssjiktet til pilaren,  $A_p$ . Resultetet fra beregningen er presentert grafisk sammen med pilarspenningen.



Figur 5.10: Her er  $A_t/A_p$  forholdet mellom kryssjiktet til bergkolonnen  $A_t$  og kryssjiktet til pilaren,  $A_p$  og pilarspenningen,  $\sigma_p$  [MPa] langs y-aksen til høyre og utvinningsgraden  $R$  [%] langs y-aksen til høyre. Beregningene er utført i Microsoft Excel.

### 5.4.2 Pilarstyrken

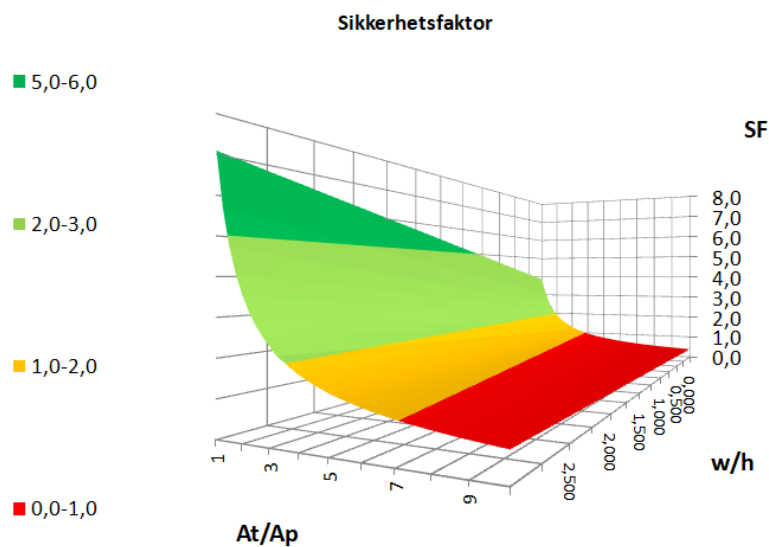
Fra Formel (12) i Avsnitt 2.4 kommer det frem at pilarstyrken,  $\sigma_{ps}$  er avhengig av forholdet  $w/h$  (pilarens bredde og høyde) og enaksiale trykkstyrken til bergmassen,  $\sigma_c$ . Her er  $\sigma_c$  estimert i Avsnitt 5.2.3. For kalksteinen er dette estimert til å være 39,9 MPa. Utregningene er presentert grafisk i Figur 5.11



Figur 5.11: Her er  $w/h$  forholdet mellom bredden og høyden til pilarene og pilarstyrken,  $\sigma_p$ . Beregningene er utført i Microsoft Excel.

### 5.4.3 Sikkerhetsfaktoren

Til slutt ønskes det å finne sikkerhetsfaktoren, SF. Her benyttes Formel (13) fra Avsnitt 2.4. Sikkerhetsfaktoren er avheging av pilarspenningen og pilarstyrken. Det er utført beregninger i Microsoft Excel for så en tredimensjonal grafisk fremvisning av utregningene, der variablene langs aksene er  $A_p/A_t$ ,  $w/h$  og SF.



Figur 5.12: Tredimensjonal grafisk fremvisning av utregningene for sikkerhetsfaktoren, SF, der variablene langs aksene er  $A_p/A_t$  og  $w/h$ . Beregningene er utført i Microsoft Excel.

#### 5.4.4 Diskusjon

Sammenhengen mellom pilarspenningen,  $\sigma_p$  og forholdet  $A_t/A_p$  (kryssjiktet til bergkolonnen,  $A_t$  og kryssjiktet til pilaren,  $A_p$ ) er proporsjonal gitt at vertikalespenningen er konstant. Fra Figur 5.10 kommer det frem at små variasjoner intervallet 1 - 5 for forholdet  $A_t/A_p$  betyr vesentlige endringer i utvinningsgraden. Det er derfor ønskelig å dimensjonere forholdet  $A_t/A_p$  nærmest 5 som mulig, om ikke høyere om det lar seg gjøre. Det er viktig å passe på at spenningen i pilarene ikke overstiger styrken til pilarene.

Pilarsstyrke er proporsjonal med forholdet  $w/h$  (bredden- og høyden til pilarene) gitt at styrken til bergmassen er konstant. Desto større bredde på pilarene gir økt styrke av pilarene, mens økt høyde gir motsatt effekt og reduserer styrken. Økt bredde av pilarene resulterer med lavere utvinningsgrad. Det er derfor ønskelig å designe pilarene med minst mulig bredde slik at utvinningsgraden øker, med en passende bredde slik at pilarstyrken ligger over pilarspenningen.

Sikkerhetsfaktoren bør helst ligge over 1,5, men videre i oppgaven ønskes det å presse grensen ned til 1,2 for å optimalisere produksjonen og øke utvinningsgraden. Fra Figur 5.12 kan det bestemmes et passende forhold for både  $w/h$  og  $A_t/A_p$  for en sikkerhetsfaktor på 1,2. De ulike forholdene skal bli testet i RockScience2.

Det bør også nevnes at vertikalspenningen har en stor betydning for utvinningsgraden. Ved å se på Figur D.16 i Tillegg D.2 kommer det frem at ved lavere vertikalspenning øker utvinningsgraden for samme forhold av  $A_t/A_p$ . Det vil derfor være viktig å estimere riktig vertikalspenning for å kunne finne riktig estimat på utvinningstallet.



## 5.5 Numerisk verktøy

Videre ønskes det å benytte seg av numerisk verktøy for å optimalisere utvinnsgraden gjennom dimensjonering av pilarer og bergrom basert på diskusjoner i Avsnitt 5.3 og Avsnitt 5.4. Det er ønskelig å utforme bergrommet og pilarer slik at det ikke oppstår uønsket problematikk knyttet til stabilitet. Numerisk modellering er utført i RockScience2, som er oppfølgeren til gamle Phase2. Her er det valgt å benytte seg av programmet RS2 2019 - Underground mining.

I denne delen har det vært fokus på å se spenningsfordelingen og deformasjonen etter utgraving av bergrommene langs sideveggene, heng, ligg og pilarene. Det største fokuset har vært pilardesign. Der det har vært ønskelig å finne kombinasjonen av bredde og høyde som gir et stabilt pilardesign med tanke på pilarstyrke og pilarspenning. Senere er det gjort en analyse på selve utforming av bergrommene og orienteringer som kan lønne seg med tanke på spenningskonsentrasjoner og strekkspenninger. Det er gjort analyse av største- og minste hovedspenning og deformasjonen som forekommer av utgravingen. I denne delen er det gjort analyse på følgende:

1. Pilardesign: bredde og høyde
2. Utforming og orientering av bergrommet

Fra analysen er det ønskelig å komme frem til følgende:

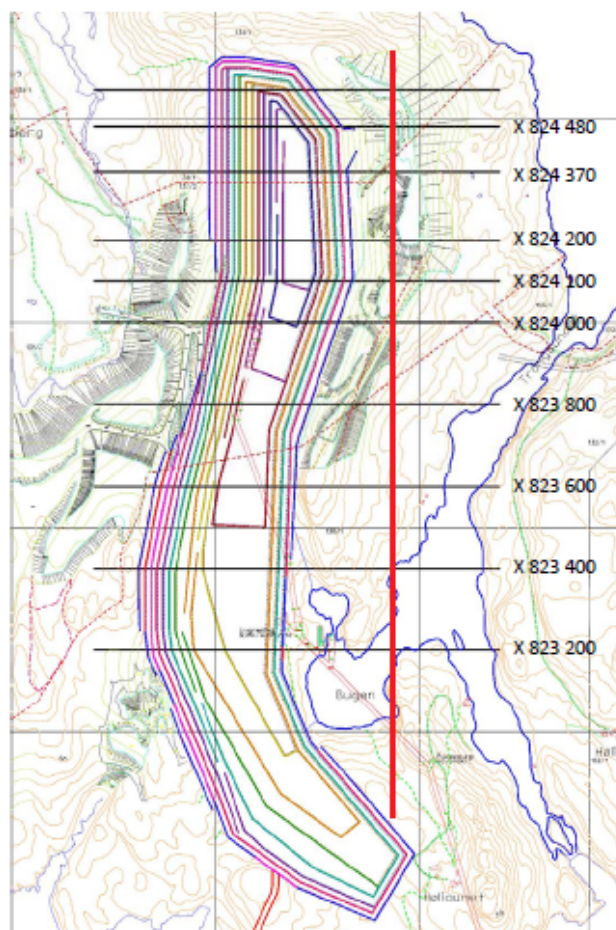
- Spenningskonsentrasjonen i både pilar, heng og sidevegger ikke overstiger trykkfastheten og den korrigerte pilarspenningen for bergmassene.
- Minimere tilfeller av negative bergspenninger i både heng og sidevegg.
- Finne en utforming som kan være gunstig i forhold til lokale spenninger
- Finne en orientering som kan være gunstig i forhold til lokale spenninger

Det er også gjort analyse på antall pilarer og hvordan dette påvirker spenningsfordelingen i de forskjellige pilarene. Dette er ikke endel av oppgaven, og resultatene fra denne analysen er lagt til i Tillegg D.3.2.

### 5.5.1 Modellen

#### Geologi

Modellen er basert på vertikallprofiler fra Akselberg som er laget av Brønnøy Kalk AS. Disse vertikallprofilene er lagt til i Tillegg D.3.1. Det er gjort tolkninger på hvordan geologien endrer seg mellom vertikallprofilene. Vertikallprofilen fra modellen er tegnet inn som den røde linjen i Figur 5.13. Det er i sørlige delen av dette området underjordsuttaket planlegges å utbygges.



*Figur 5.13: Oversiktskart av vertikallprofiler på Akselberg. Røde linjen viser vertikallprofilen som er modellert i RockScience2. Kartet er laget av Brønnøy Kalk AS og modifisert i Paint.*

Fra Grøv og Holmøy, 2000 nevnes det at dagbruddsproduksjonen er forventet ned til kote 120, og det er ønskelig å ha horisontalpilar på ca 30 m. Det er derfor valgt at utgravingen av underjordsuttaket skal forekomme fra ca kote 150 og ned.

### Inngangsparametere

Akselberg domineres hovedsaklig av to bergarter, gneis og kalkstein. For å ikke komplisere modellen er det derfor valgt å forholde seg til disse to bergartene. Gjennomsnittsverdier for bergmekaniske egenskaper av bergartene er brukt for å definere inngangsparametere for modellen. Verdiene er hentet fra Tabell 7 fra Avsnitt 4.2 og skaleringene fra Avsnitt 5.2. Disse er presentert i Tabell 15.

Bergart	E-modul [GPa]	Poissons- forfold	Trykk- fasthet [MPa]	Strekk- fasthet [MPa]	Brudd- vinkel [°]	GSI
Kalkstein	43,7	0,30	39,3	3,6	19,5	91,5
Gneis	22,9	0,30	65,4	6,1	13,5	92,0

Tabell 15: Inngangsparametere av bergmekaniske egenskaper som er brukt i RockScience2. Verdiene er hentet fra Tabell 7 fra Avsnitt 4.2 og Avsnitt 5.2.

Spenningsstørrelsen og orienteringen er hentet fra Tabell 8. Her er vertikalspenningen,  $\sigma_v = \sigma_2$  erstattet med 8 MPa. Dette er bestemt i Avsnitt 4.3, dermed blir  $\sigma_v = \sigma_3 = 8$  MPa. Dette er presentert i Tabell 16.

	Spenning [MPa]	Orientering [°]	Fall [°]
$\sigma_1$	14,6	252	14
$\sigma_2$	9,6	108	74
$\sigma_3$	8,0	344	9

Tabell 16: Enheten for spenning er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa.  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  og  $\sigma_3$  er hovedspenninger. Fall er vinkelen mellom hovedspenningen og horisontalplanet. Tabellen er hentet fra SINTEF, 1997a.

Andre egenskaper som er benyttet i modellen:

- Konstant vertikalspenning
- Hoek-Brown bruddkriterie
- Materialet er drenert
- Elastisk modell

### 5.5.2 Bergroms- og pilardesign - lengde og høyde

Basert på Avsnitt 2.2.2 og Avsnitt 5.3 er det valgt å utforme bergrommet rektangulært, der den lengste siden er orientert parallelt med største horisontalspenning som også er største hovedspenning. Her antas pilarbredden = pilarlengde, altså kvadratisk formet pilarer. Analysen er utført i tre deler, og de tre delene er som følger:

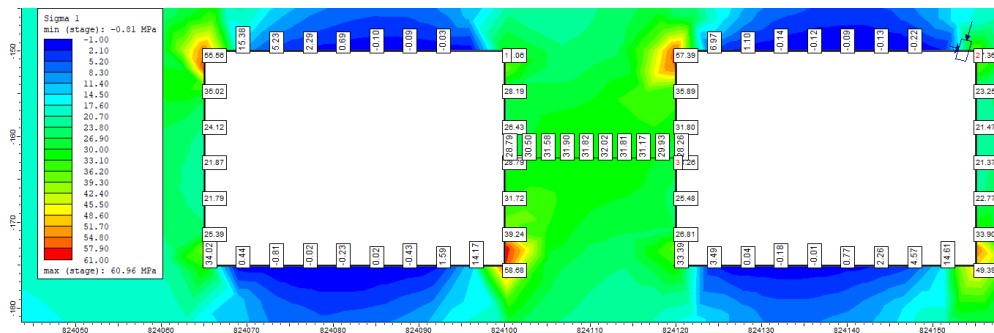
1. Ønskelig å finne passende bergromslengde,  $l_b$ : Her er det ønskelig å finne en passende lengde på bergrommet. Både pilarbredden,  $w$  og bergroms- og pilarhøyden (der  $h_b = h_p$ ) er holdt konstant.
2. Ønskelig å finne passende pilarbredden,  $w$ : Her er det ønskelig å finne en passende bredde på pilaren. Både bergromsbredden,  $l_b$  og bergroms- og pilarhøyden (der  $h_b = h_p$ ) er holdt konstant.
3. Ønskelig å finne passende pilarhøyde,  $h_p$  og bergromshøyde,  $h_b$ : Her er det ønskelig å finne en passende høyde på både pilarene og bergrommet. Både bergromsbredden,  $l_b$  og pilarbredden,  $w$  er holdt konstant.

Kombinasjonene av de ulike lengdene-, breddene- og høydeforholdene er presentert i Tabell 17.

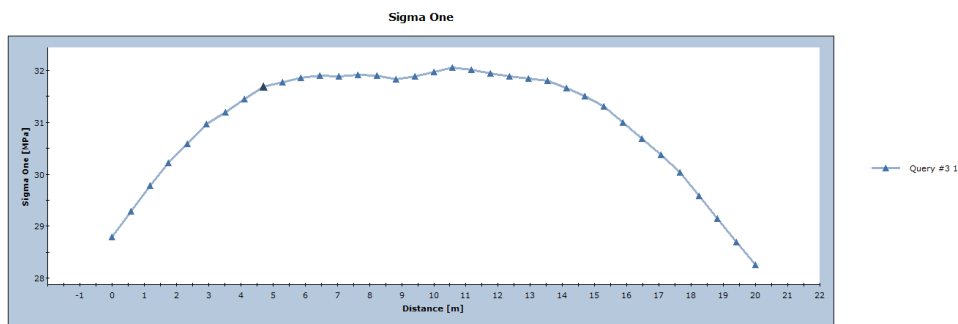
I denne delen er det valgt å sette fokus på spenningfordeling langs pilarene, og ikke spenningsfordeling langs heng, ligg og sidevegger. Fra denne analysen kommer det frem at en passende løsning på bergrommenes dimensjoner kan være 35 m x 25 m ( $l_b \times h_b$ ). Tilsvarende for pilarenes dimensjoner er 20 m x 25 m ( $w \times h_p$ ). Resultatet fra modelleringen er presentert i Figur 5.14, Figur 5.15, Figur 5.16 og Figur 5.17.

Pilar ( $w \times h_p$ )	Bergrom ( $l_b \times h_b$ )
[m x m]	[m x m]
20 x 20	25 x 20
20 x 20	20 x 20
20 x 20	35 x 20
20 x 20	40 x 20
18 x 20	35 x 20
20 x 20	35 x 20
22 x 20	35 x 20
24 x 20	35 x 20
25 x 20	35 x 20
20 x 15	35 x 15
20 x 18	35 x 18
20 x 25	35 x 25

Tabell 17: Oversikt over ulike dimensjoner av bredde, lengde og høyde på bergrommet og piler der det er utført numerisk analyse.



Figur 5.14:  $\sigma_1$ -analyse med pilarbredde 20 m, pilarhøyde 25 m, bergromslengde 35 m og bergromshøyde 25 m.



Figur 5.15:  $\sigma_1$ -plott av pilarspenning med pilarbredde 20 m, pilarhøyde 25, bergromslengde 35 m og pilarhøyde 25 m.

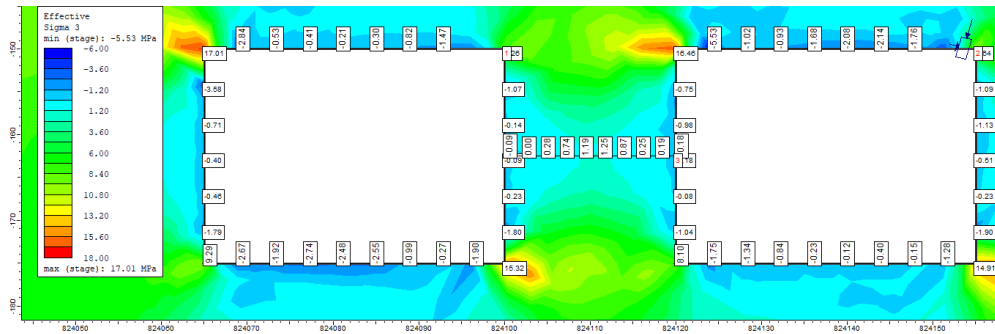
Fra Figur 5.15 kommer det frem at spenningsfordelingen i pilarene er i en faseovergang der den skifter fra kamel- til dromedar-fordeling. Dette er optimalt med tanke på utnyttelsen av bæreevnen til pilarene.

w/h	20/25 = 0,8
$\sigma_{ps}$	37,8
$\sigma_{pMax}$	32,05
SF	1,18

Tabell 18: Her er; w/h : Forholdet mellom bredden og høyden til pilarene,  $\sigma_{ps}$ : korrigert pilarstyrke fra Figur 5.9,  $\sigma_{pMax}$ : maksimum pilarspenning utifra numerisk modellering. Verdien er hentet fra Figur 5.15, SF: Sikkerhetsfaktoren.

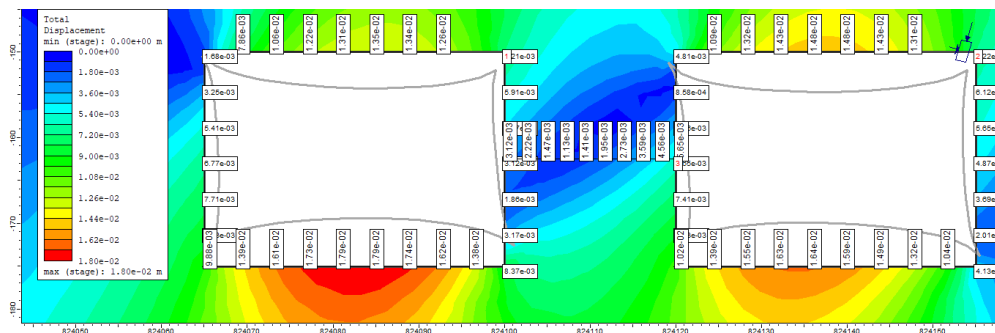
Det kommer også frem at pilarspenningene ikke overstiger trykkfastheten til bergmassen. Her er største pilarspenning,  $\sigma_{pMax} = 32,05$  MPa og korrigert pilarstyrke fra Figur 5.9,  $\sigma_{ps} = 37.8$  MPa. Sikkerhetsfaktoren fra Formel (11) Avsnitt 2.4 gir 1,18. Denne verdien er noe under ønskelig sikkerhetsfaktor på 1,20.

Fra analysen kommer det frem at det oppstår store spenningskonsentrasjoner i kantene der sideveggene møter heng i nord og gulvet i sør. Her er spenningskonsentrasjonene mye høyere enn pilarstyrken og bergartens trykkfasthet. Det må også nevnes at spenningskonsentrasjonen er veldig lokal. Det oppstår også lokale strekkspenninger i både heng og ligg. Disse er av liten størrelsesorden, mindre enn strekkfastheten og anses som lite problematisk. Det er fortsatt ønskelig å redusere strekkspenningene om det er mulig.



Figur 5.16:  $\sigma_3$ -analyse med pilarbredde 20 m, pilarhøyde 25 m, bergromslengde, 35 m og bergromshøyde 25 m.

Analysen utført på minste hovedspenning kommer det frem at det er strekkspenninger generelt rundt hele bergrommet, og disse er av små størrelsesorden og lite problematisk utenom ett område. Dette området, gjelder kanten i nord der sideveggen møter heng. Her er strekkspenningene høye, men akkurat under strekkfastheten (grensen til å gå i strekkbrudd). Det er ønskelig å gjøre noe med designet for å forhindre denne høye strekkspenningen.



Figur 5.17: Deformasjonsanalyse med pilarbredde 20 m, pilarhøyde 25 m, bergromslengde 35 m og bergromshøyde 25 m.

Deformasjonen generelt er lavt over hele bergromsåpningen, og anses å være lite problematisk.

### 5.5.3 Utforming og orientering

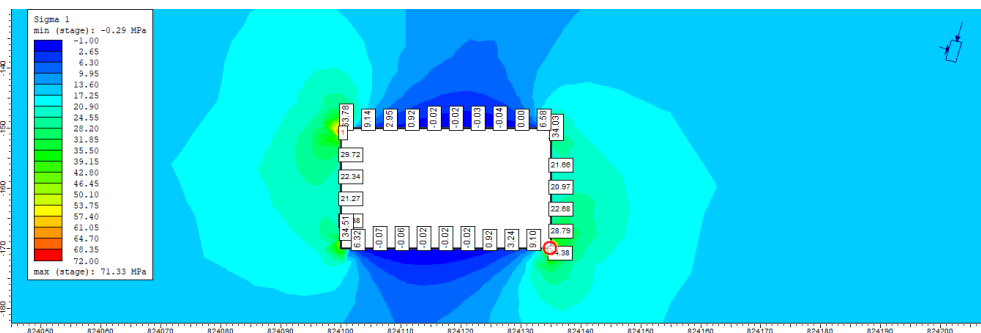
Fra analysen utført i Avsnitt 5.5.2 kommer det frem at det oppstår store spenningskonsentrasjoner der sideveggen møter ligg i nord og gulvet i sør ( $\sigma_1$ -analysen). Spenningene her blir så høye at de overstiger både trykkfastheten til bergartene og den korrigerte pilarstyrken. I tillegg til dette oppstår det strekkspenninger generelt rundt hele bergrommet, men det er et sted den stiger tilnærmet strekkfastheten. I denne delen av analysen er det ønskelig å se om det er mulighet for å gjøre noe med dette ved å endre på utformingen og orienteringen av bergrommet. Det er ønskelig å designe og orientere bergrommet for å unngå eller redusere stabilitetsproblemer, dermed redusere bergsikringskostnadene. Denne delen består av følgende analyse:

1. Utforming av bergrommet: Det er ønskelig å finne optimal løsning på utformingen av bergrommet slik at spenningskonsentrasjonen gjevnes ut og ikke overstiger trykkfastheten til bergartene eller den korrigerte pilarspenningen. Det er gjort analyse på en rekke forskjellige utforminger, og til slutt valgt to utforminger.
2. Orientering: Til slutt er det ønskelig å orientere bergrommet for å se hva slags effekt dette medfører spenningsfordelingen. Bergrommets lengste side er blitt orientert tilnærmet parallelt med største horisontalspenning, som også er største hovedspenning.

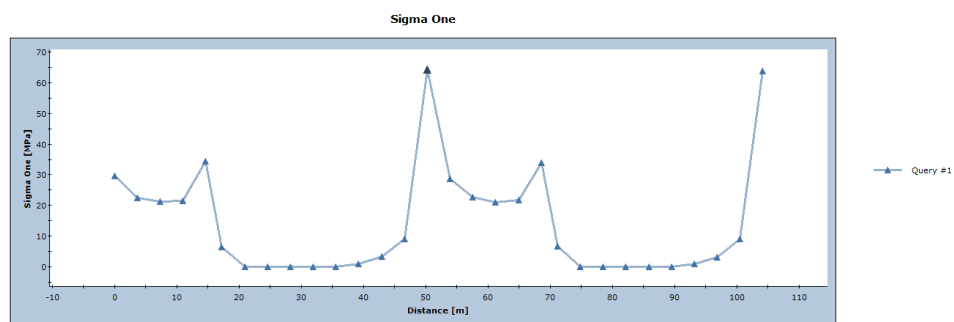
For å ikke komplisere modellen er det valgt å benytte seg av et bergrom, der bergromsdesignet er basert på resultatene fra analysen utført i Avsnitt 5.5.2. Bergrommetsdimensjoner er som følgende: Lengde = 35 m og høyde 25 m.

### Rektangulær utforming av bergrommet

Utformingen er bestemt fra Avsnitt 5.3, der det er en fordel å utforme bergrommet i rektangulært eller som en ellipside med den lengste siden langs største horisontalspenning (ikke prallelt i dette tilfellet). Det skal først se på rektangulær utforming. Resultatet fra modelleringen er presentert i Figur 5.18, Figur 5.19, Figur 5.20 og Figur 5.21.



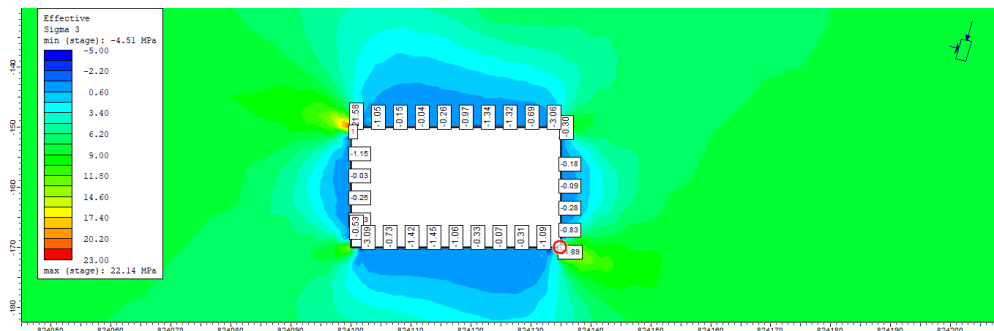
Figur 5.18:  $\sigma_1$ -analyse av et rektangulært bergrom orientert parallelt med horisonten.



Figur 5.19:  $\sigma_1$ -plott av et rektangulært bergrom orientert parallelt med horisonten.

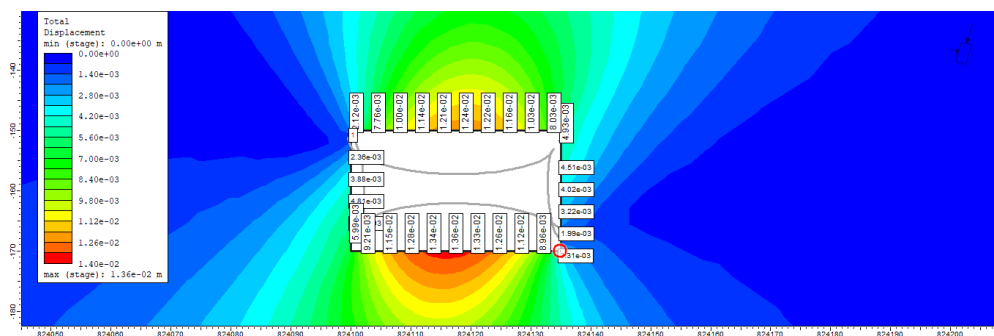


Fra Figur 5.18 og Figur 5.19 kan det observeres to områder der bergspenningen overstiger trykkfastheten til bergmassen. Dette er forventet da tilsvarende spenningskonstrasjoner er observert i Avsnitt 5.5.2. Dette gjelder der sideveggen møter heng i nordlige delen av bergrommet (her er spenningen 63,7 MPa) og ligg i sørlige delen av bergrommet (64,4 MPa). Det observeres også negative spenninger, altså strekkspenninger i sidevegg og heng, men disse er av liten størrelseorden.



Figur 5.20:  $\sigma_3$ -analyse rektangulært bergrom orientert parallelt med horisonten.

Ved å se på minste hovedspenning kommer det frem at det er negative spenninger generelt overalt av bergrommet, men disse er av liten størrelsesorden. Det er derimot observert to områder der strekkspenningene er relativt høye. Dette gjelder der sideveggen møter heng i sør og ligg i nord. Her er spenningene lavere enn strekkstyrken til bergmassen. Dette kan fortsatt være to problematiske områder.



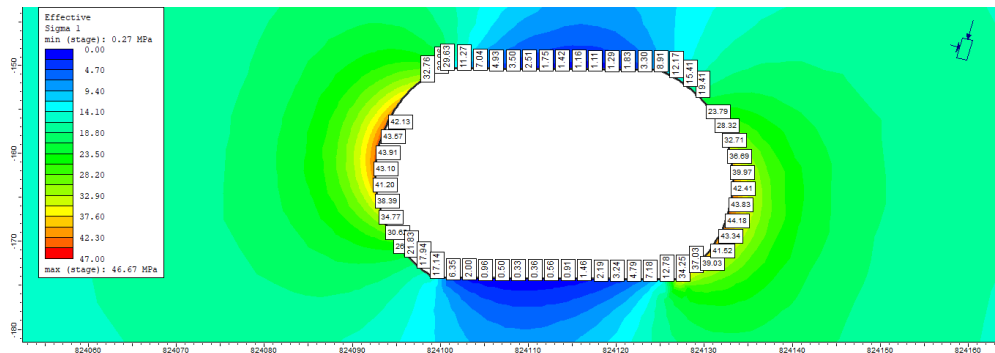
Figur 5.21: Deformasjons-analyse rektangulært bergrom orientert parallelt med horisonten.

De største deformasjonene er i heng og ligg. Det oppstår også noe deformasjon i sideveggene. Generelt kan det sies at deformasjonene er av liten grad.

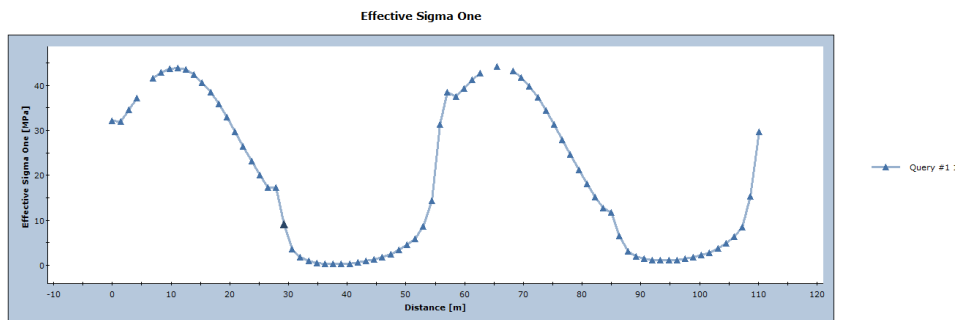
### Elipsiodeutforming av bergrommet

Ved rektangulær utforming oppnås det spenningskonsentrasjoner i kantene av bergrommet. Dette gjelder spesielt der sideveggen møter heng i nord og gulvet i sør. Minste hovedspenning er negativt

rundt nesten hele bergrommet. Det er derfor ønskelig å analysere om en ellipsoideformet utgraving av bergrommet kan være mer gunstig. Resultatet fra modelleringen er presentert i Figur 5.22, Figur 5.23, Figur 5.24 og Figur 5.25.

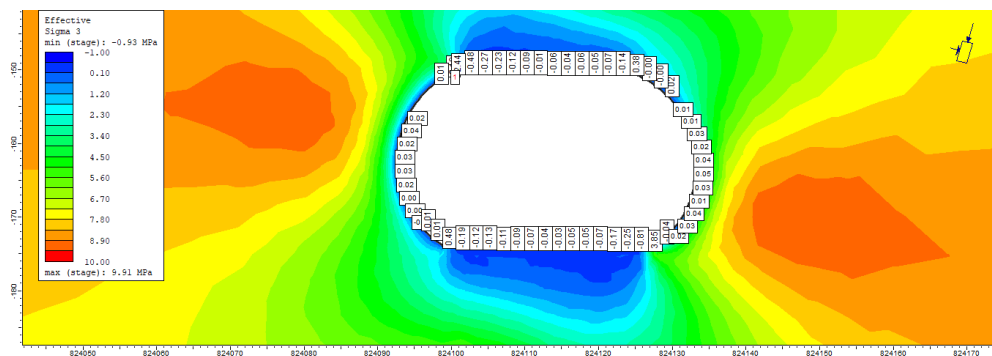


Figur 5.22:  $\sigma_1$ -analyse av et ellipsoideformet bergrom orientert parallelt med horisonten.



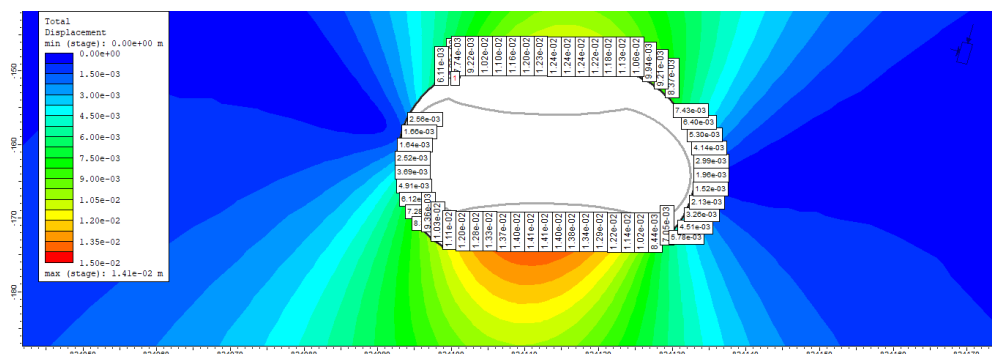
Figur 5.23:  $\sigma_1$ -plott av et ellipsoideformet bergrom orientert parallelt med horisonten.

Ved ellipsoideutformet bergrom, spres spenningskonsentrasjonen over et større område. Det oppstår to områder der bergspenningen stiger høyere enn trykkfastheten til bergmassen og strekker seg over et større område. Dette gjelder i veggene i nordlige og sørlige delen av bergrommet. Selv om spenningen overstiger trykkfastheten til bergmassene og korrigerte pilarstyrken, er bergspenningene nå mye mindre enn tilfeller over. Bergspenningen i heng er positive, noe som er positivt sammenlignet med rektangulær utforming av bergrommet.



Figur 5.24:  $\sigma_3$ -analyse ellipsoideformet bergrom orientert parallelt med horisonten.

Fra denne analysen kommer det frem at det fortsatt er negative spenninger i både heng og ligg. Disse er av liten størrelsesorden. Der sideveggene møter heng i nord er strekkspenningen noe stor. Dette kan være et problematisk området. Det observeres også positive spenninger i sideveggene, noe som er positivt sammenlignet med tilfellet over.

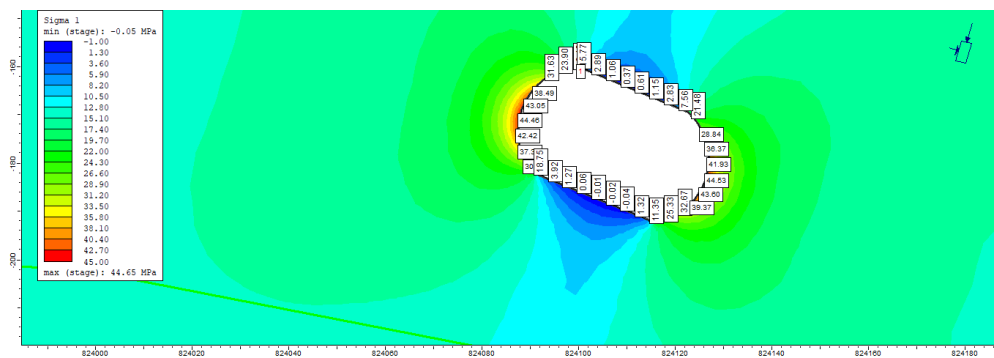


Figur 5.25: Deformasjons-analyse ellipsoideutformet bergrom orientert parallelt med horisonten.

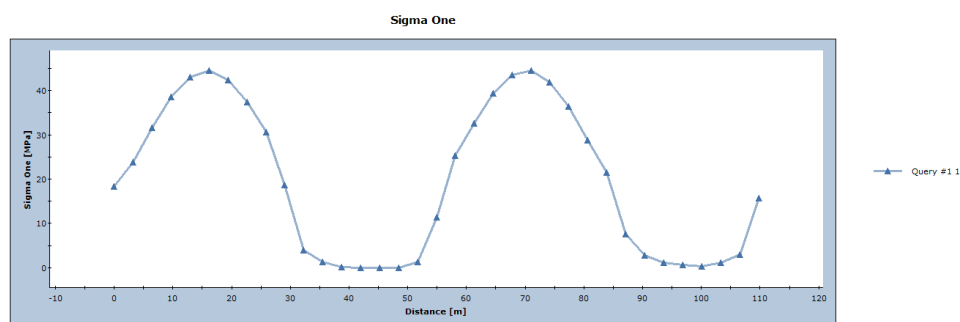
I likhet med rektangulær utforming oppstår det deformasjoner spesielt i tak og ligg, men disse er av liten størrelsesorden. Det anses derfor som lite problematisk.

### Elipsiodeutforming av bergrommet orientert parallelt med hovedspenningen.

Det er også ønskelig å se om orienteringen av bergrommet, der lengste side er orientert tilnærmet parallelt med største hovedspenning har noe effekt på stabiliteten i bergrommet. Bergrommet er ellipsoideformet. Resultatet fra modelleringen er presentert i Figur 5.26, Figur 5.27, Figur 5.28 og Figur 5.29.

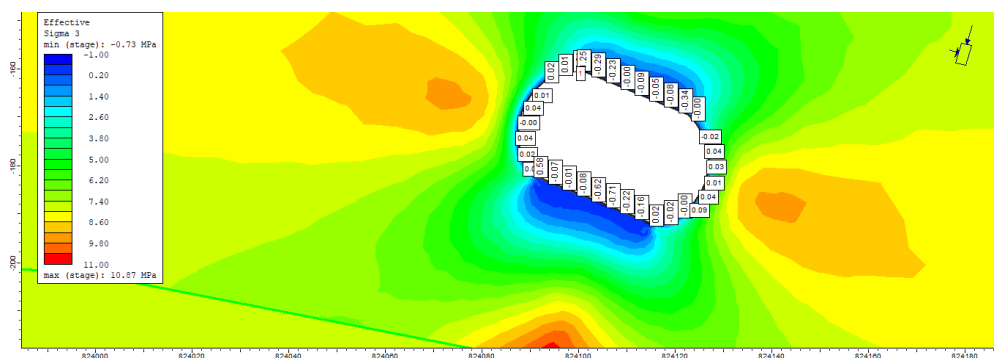


Figur 5.26:  $\sigma_1$ -analyse av et ellipsoideformet bergrom, der lengste siden av ellipsoiden er orientert tilnærmet parallelt med største hovedspenning.



Figur 5.27:  $\sigma_1$ -plott av et ellipsoideformet bergrom, der lengste siden av ellipsoiden er orientert tilnærmet parallelt med største hovedspenning.

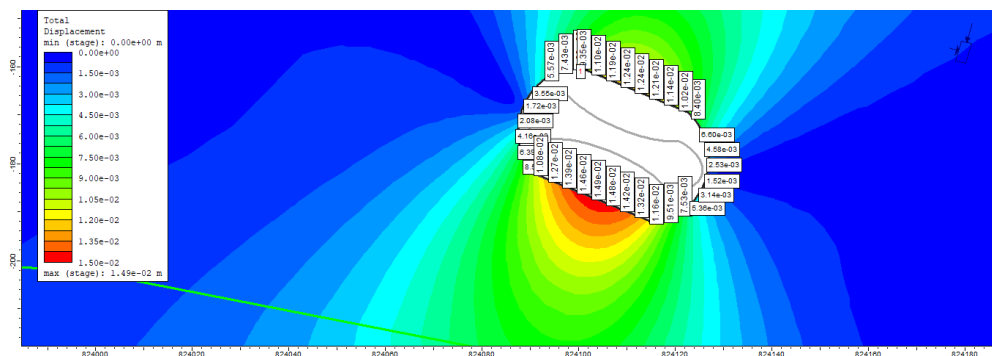
Det er ingen store endringer i spenningskonsentrasjonen sammenlignet med tilfellet der bergrommet er ellipsoideformet og orientert prallelt med horisonten. I likhet med tidligere utforminger, oppstår det to områder, sideveggene i nord og sør, der bergspenningene overstiger trykkfastheten til bergmassen. Ulempen med orienteringen er at spenningene i heng er lavere enn tilfellet over, men spenningen er fortsatt positiv.



Figur 5.28:  $\sigma_3$ -analyse ellipsoideformet bergrom, der lengste siden av ellipsoiden er orientert tilnærmet parallelt med største hovedspenning.

Selv om minste hovedspenning er lavt i begge sideveggene er den positiv. Fordelen med å orientere bergrommet tilnærmet parallelt med største hovedspenning er strekkspenning i kanten der sideveg-

gen og heng møtes i nord fortsatt er negativ, men vesentlig mindre (-0,4 MPa). Den er såpass liten at den ikke anses som å være problematisk.



Figur 5.29: Deformasjons-analyse ellipsoideutformet bergrom, der lengste siden av ellipsoiden er orientert tilnærmet parallelt med største hovedspenning.

Fra deformasjonsanalysen kommer det frem at bergrommet generelt er utsatt for deformasjoner i mindre grad. Dette gjelder fra heng, sideveggene til gulvet. Deformasjonen er såpass liten at det anses som lite problematisk knyttet til stabiliteten.

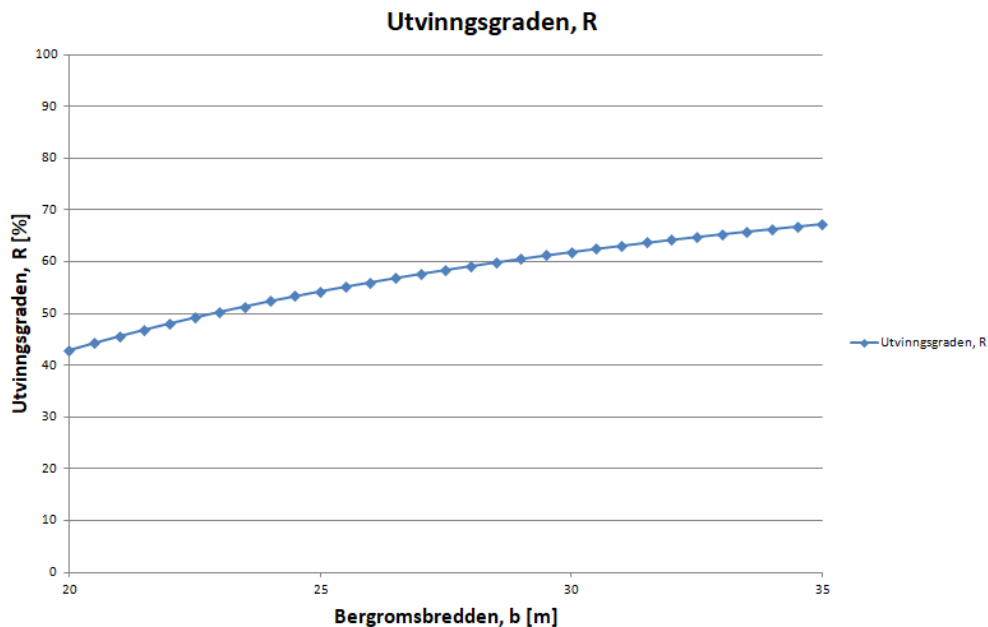
### 5.5.4 Utvinnsgraden

Fra analysene utført ovenfor kommer det frem at en passende dimensjonering av bergrommene og pilarene er listet i Tabell 19.

w: Pilarbredde	20 m
$h_p$ : Pilarhøyde	25 m
$l_b$ : Bergromslengde	35 m
$h_b$ : Bergromshøyde	25 m

Tabell 19: Ønskelig dimensjonering av bergrom og pilarer.

Basert på dimensjoneringen i Tabell 19 er det gjort beregninger i Microsoft Excel, for å finne utvinnsgraden for underjorduttaket på Akselerg. Siden det er utført 2D-modellering, så er det ikke gjort noe analyse på hvordan bredden til bergrommet påvirker stabiliteten. Her er det antatt at pilarene er kvadratisk formet og bergromslengden er 35 m. Begge disse lengdemålingene er satt til å være konstante. Formel (13) fra Avsnitt 2.4 er benyttet. Resultatet fra utregningen er presentert grafisk i Figur 5.30



Figur 5.30: Grafen viser sammenhengen mellom utvinnsgraden og bergromsbredden. Grafen er laget i Microft Excel.

### 5.5.5 Diskusjon

Dette er en meget forenklet modell, der det er gjort endel geologisk tolkning og en rekke forenklinger for å ikke komplisere modellen. Den tar for seg gjennomsnittsverdier av bergmekaniske egenskaper, vertikalspenningen er konstant, materialet er drenert og 2-dimensjonalt. Det er heller ikke lagt inn sprekker og svakhetsoner i modellen.

Det er i denne delen utført analyse på forskjellige dimensjoner av både bergrom og pilarer. Basert på analysen utført i Avsnitt 5.3 er det ønskelig med enten rektangulært eller ellipsoide utforming av bergrommet, der den lengste siden orienteres i retning største horisontalspenningen. Fra Avsnitt 5.4 ønskes det å presse dimensjoneringen av forholdet  $A_t/A_p$  nærmest mulig 5, om ikke høyere om det lar seg gjøre, for å kunne øke utvinningsgraden. Fra numeriske modelleringen kommer det frem at dette ikke er så lett. Det er også ønskelig å finne en kombinasjon av pilarbredde og høyde som gir passe styrke og størst mulig utvinningsgrad. Ved å benytte seg av RockScience2 og numerisk analyse av en rekke forskjellige dimensjoner av både bergrom og pilarer kommer det frem at dimensjonene i Tabell 19 er av favør. Spenningsfordelingen i pilarene er i dette tilfellet er i en overgangsfase fra kamel- til dromedar-fordeling, noe som er optimalt med tanke på utnyttelsen av bæreevnen til pilarene. Sikkerhetsfaktoren ligger på 1,18, noe som er noe lavere enn ønskelig. Det må nevnes at spenningen settes opp mot enaksiell trykkfasthet. I virkeligheten vil pilarene være omsluttet av spenning, noe som betyr at pilarensstyrke er noe større.

Ved å benytte seg av dimensjonene i Tabell 19, kommer det frem at det oppstår store spenningskonsentrasjoner som er mye høyere enn enaksiell trykkfasthet for bergarten og den korrigerte pilarstyrken, der sideveggene møter heng i nord og ligg i sør. Det observeres også negative spenninger, altså strekkspenninger. Disse er generelt lave, utenom på et sted, der sideveggene møter heng i nord. Her er strekkspenningen såpass store at de nesten overskrider strekkfastheten til bergarten. Fra numerisk modellering kommer det frem at det er en fordel å avrunde kantene til bergrommet og orientere bergrommets lengste side tiltet tilnærmet parallelt med største horisontalspenning. Spenningskonsentrasjonen er forstatt høyere enn både enaksiell trykkfastheten og den korrigerte pilarstyrken. I dette tilfelle fordeles spenningskonsentrasjonen langs sidene, dermed blir bergspenningen vesentlig lavere. Spenningskonsentrasjonen avhengig av formen er lokalt, og nødvendig bergsikring bør vurderes. De negative spenningene og deformasjonen i heng blir ved orientring vesentlige lavere og anses som lite problematisk. Siden deformasjonen er av liten størrelsesorden så har Hoeks lov god gyldighet.

I denne oppgaven er det utført 2D - numerisk modellering, noe som betyr at analysen som er utført forteller ikke noe om sammenhengen mellom bredden og stabiliteten. Det er gjort en rekke utregninger for å finne sammenhengen mellom bredden, bergroms- og pilardesing og utvinningsgraden. Fra dimensjoneringen i Tabell 19 kan utvinningsgraden med en sikkerhetsfaktor på 1,18 bli estimert til å være et sted mellom 42,9 - 61,9 %, der bergromsbredden ligger mellom 20 - 30 m.



## 6 Konklusjon

Med utgangspunkt i forståelsen av geologien og de geologiske prosessene, regionalt (Velfjordområdet) og lokalt (Akselbergområdet), samt strukturgeologisk analyse, er det gjort en systematisering av anlegg med rådata av ønsket interesse. Disse anleggene er Akselberg, Forbergskog og Engadalen, der Akselberg og Forbergskog befinner seg i nordlige Sauskarbonatene og Engadalen i Hillstadvjellkarbonatene. Begge karbonatene befinner seg i nedredekke av Helgeland dekkekomplekset som igjen er en del av øverste allokton.

Fra bergspenningsanalysen kommer det frem at Nordland er kjent for å høye spenningforhold enn det den teoretiske tilsier. Dette kommer av en rekke faktorer som tektonikk og transportering av De kaledonske skyvedekkene, residualspenninger som kommer av brå nedsmelting av is og erosjon av overdekket, arching-effekt og inhomogenitet som bidrar til endring av det naturlig spenningsbildet. Dette gjelder også ved kontaktsonen mellom lokale plutoner og vertbergartene, der stivhetsforskjeller fører til variasjon av spenningsbildet desto nærmere en kommer kontaktsonen. Akselbergområdet består av fjorder og daler, og ved relativt lave dybder vil lokale spenninger bli påvirket av dette, dalsideeffekten, og blir orientert parallelt og normalt langs dalsiden. Det vil også oppstå spenningskonsentrasjoner langs dalsiden, der spenningskonsentrasjonen øker på dalbunnen. De overnevnte faktorene til sammen kan gi en forklaring på hvordan spenningsorienteringen og regimet varierer så mye lokalt mellom Akselberg, Forbergskog og Engadalen. Basert på dette velges det å benytte seg av bergspenningsmålinger og bergmekaniske egenskaper fra Akselberg, selv om disse avviker fra målinger fra Engadalen og Forbergskog. Her blir vertikalspenningen bli skalert fra 11,3 MPa til 8 MPa, som er en nedskalert estimat av in situ-målte verdier og oppskalert estimat av den teoretiske vertikalspenningen. Dette benyttes videre i empiriske-, analytiske beregninger og numerisk modellering.

Fra analysen av stabilitetsforhold, sprekker og svakhetsoner kommer det frem at det eksisterer fire sprekkesett, der tre dominerer. Det velges derfor å se på de tre sprekkesettene, S1, S2 og S3 videre i oppgaven. Den siste, S4 velges å se bort i fra da den er av liten størrelsesorden. Utenom at det oppstår noen lokale stabilitetsproblemer, består bergmassen i Akselberg av middels til meget god kvalitet. Noen få sprekker er glatte med korte avstander, men ellers er de fleste sprekkeflater i overflaten og en varierende avstand fra 0,5 - 3,0 m. Fra sprekkeanalysen kommer det frem at den beste orienteringen av bergrommet er 325 - 330° fra nord. En annen mulig løsning, men ikke like optimalt er 245 - 250° fra nord.

Fra empiriske verktøy kommer det frem at det er ønskelig med et rektangulært eller ellipsoide form på utgravingen langs største horisontalspenning. Langs minste horisontalspenning er det fordelaktig å ha et kvadratisk eller sirkulær utforming av bergrommet.

Fra det analytiske verktøyet som er brukt, ses sammenhengen mellom pilarspenningen,  $\sigma_p$  og forholdet  $A_t/A_p$  (kryssjiktet til bergkolonnen,  $A_t$  og kryssjiktet til pilaren,  $A_p$ ) er proporsjonal gitt at vertikalspenningen er konstant. Det er ønskelig å presse dette forholdet nærmest mulig 5 eller mer om det lar seg gjøre, for å øke utvinningsgraden. Små endringer av forholdet  $A_t/A_p$  i intervallet 1 - 5 utgjør vesentlig endringer av utvinningsgraden. Det er ønskelig å dimensjonere pilarbredden minst mulig, da dette gir økt utvinningsgrad. Desto mindre pilarbredde fører også til svakere pilarstyrke. Det er derfor ønskelig å finne en kombinasjon der forholdet mellom bredden og høyden til pilarene gir tilstrekkelig styrke mot pilarspenningen, men samtidig gir høyest mulig utvinningsgrad. Selv om det anbefales en sikkerhetsfaktor på 1,5 på gruvedrift, ønskes sikkerhetsfaktoren til å bli presset ned til 1,2 for å se utvinningspotensialet til dette underjordsuttaket.

Det er laget en meget forenklet modell for å utføre numerisk analyse. På bakgrunn av denne analysen kommer det frem at en god løsning på dimensjonene av bergrommet er: Lengde = 35 m og Høyde 25 m og pilardimensjoner: Bredde 20 m og Høyde 25 m. Ved å benytte seg av disse dimensjonene oppstår det en spenningsfordelingsovergang i pilarene. Spenningsfordelingen ser ut til å være på grensen der den går fra kamel-fordeling til dromedar-fordeling, noe som er optimalt med tanke på utnyttelsen av pilarenes bæreevne. Sikkerhetsfaktoren blir i dette tilfellet 1,18, som er noe lavere enn ønsket. Styrken til pilarene er bestemt av enaksiell trykkfasthet, og i virkeligheten vil denne styrken være noe høyere da innspenningen av pilarene bidrar til økt styrke. Dette betyr at sikkerhetsfaktoren i virkeligheten er noe høyere enn 1,18. Videre oppstår det problematik opp mot denne dimensjoneringen. Det oppstår store spenningskonsentrasjoner,  $\sigma_1$ -analyse i overgangen sidevegg og heng i nord som er mye høyere enn enaksiell trykkfasthet og den korrigerte pilarstyrken. Tilsvarende oppstår det store strekkspenninger,  $\sigma_3$ -analysen, som er på grensen til å overstige strekkfastheten. Numeriske analysen viser at det er en fordel å avrunde kantene til bergrommet til en mer elliptisk utforming og orientere den lengste siden tilnærmet parallelt med største hovedspenning. Spenningskonsentrasjonen fordeles nå utover et større området og reduseres. Selv om spenningskonsentrasjon er høyere enn enaksiale trykkfastheten og den korrigerte pilarspenningen, er den vesentlig lavere enn det den var tidligere. Spenningen oppleves å være lokalt og nødvendig bergsikringstiltak bør derfor vurderes her. Strekkspenningen blir også redusert

betraktlig og regnes som lite problematisk. Derformasjonsanalysen tyder også på lite problematikk knyttet til deformasjon.

Fra både empiriske- og analytiske beregninger kommer det tydelig fram at forskjellige estimater av vertikalspenningen gir ulike resultater. Desto mindre vertikalspenning gir høyere utvinningsgrad ved samme forhold av  $A_t/A_p$ , mindre utvinningsgrad dersom vertikalspenningen øker. For empiriske beregningmetoder, gir ulike verdier av vertikalspenningen ulike løsninger på lønnsomme utforminger av bergrommet. Det er derfor viktig å estimere riktig vertikalspenning for å kunne bestemme optimale design av både bergrom og pilarer.

Det er kun utført 2D - analyse av stabilitetsforholdet, noe som betyr at analysen som er utført ikke forteller noe om sammenhengen mellom bredden og stabiliteten. Utvinningsgraden med pilar- og bergromsdimensjoner fra Tabell 19 blir estimert til å være et sted mellom 42,9 - 61,9 %, der bergromsbredden varierer mellom 20 - 30 m.

## Referanser

- Adam, J. (1988). *Petrographic und strukturelle Untersuchungen an hochmetamorphen Gneisen und Magmatitten des östlichen Grøndalsfjell, Helgelanddecke, Kaledonien, Nordland/Norwegen*. Technische Universität Clausthal.
- Andersen, B. G. (2000). *Istider i Norge: landskap formet av istidenes breer*. Texan Tech University.
- Andreassen, P. G. (1994). *The Baltoscandian margin in Neoproterozoic - Early Paleozoic time. Some constraints on terraine derivation and accretion in the Arctic Scandinavian Caledonides*. Tectonophysics.
- Barnes, C. G., Prestvik, T., Nordgulen, O. og Barnes, M. A. (1992). *Geology of three dioritic plutons in Velfjord, Nordland*. Norges Geologiske Undersøkelse.
- Barnes, C. G., Frost, C. D., Yoshinobu, A. S., McArthur, K., Barnes, M. A., Allen, C. M., Nordgulen, Ø. og Prestvik, T. (1985). *Timing of sedimentation, metamorphism, and plutonism in the Helgeland Nappe Complex, north-central Norwegian Caledonides*. Geosphere.
- Barnes, C. G. og Prestvik, T. (2000). *Conditions of pluton emplacement and anatexis in the Caledonian Bindal Batholith, north-central Norway*. Norsk Geologisk Tidsskrift.
- Barnes, C. G., Yoshinbo, A. S., Prestvik, T., Nordgulen, Ø., Karlsson, H. R. og Sundvoll, B. (2002). *Mafic Magma Intraplating: Anatexis and Hybridization in Arc Crust, Bindal Batholith, Norway*. Journal of Petrology.
- Barton, N., Lien, R. og Lunde, J. (2007). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics and Rock Engineering*. Norges Geotekniske Institutt.
- Bingen, B., Demaiffe, D. og van Breemen, O. (1998). *The 616 Ma Old Egersund Basaltic Dike Swarm, SW Norway, and Late Neoproterozoic Opening of the Iapetus Ocean I*. The Journal of Geology.
- Bryhni, I. (2018). *Istid*. Hentet 15. oktober 2019, fra <https://snl.no/istid>
- Braathen, A., Nordgulen, Ø., Osmundsen, P. T., Andersen, T. B., Solli, A. og Roberts, D. (2000). *Devonian, orogen-parallel, opposed extension in the Central Norwegian Caledonides*. Geology.
- Braathen, A., Nordgulen, Ø., Osmundsen, P. T., Andersen, T. B., Solli, A. og Roberts, D. (2001). *Devonian, orogen-parallel, opposed extension in the Central Norwegian Caledonides re- ply*. Geology.
- Bunkholt, I. (2019). *Underground mining Akselberg*. Brønnøy Kalk AS.

- Das, R., Singh, P. K., Kainthola, A. og Panthee, S. (2017). *Numerical analysis of surface subsidence in asymmetric parallel highway tunnels*. Journal of Rock Mechanics; Geotechnical Engineering.
- Deere, D. U. (1963). *Technical description of rock cores for engineering purposes*. Felsmechanik und Ingenieurgeologie.
- Dumond, G. (2002). *Magma chamber construction in the middle crust: insights from the Sausfjellet pluton, Bindal batholith, Norway*. Texan Tech University.
- Dumond, G., Yoshinobu, A. S. og Barnes, C. G. (2005). *Midcrustal emplacement of the Sausfjellet pluton, central Norway: Ductile flow, stoping, and in situ assimilation*. Department of Geosciences, Texas Tech University.
- Eide, E. A., Osmundsen, P., Meyer, G. B. og Kendrick, M. A. (2002). *The Nesna Shear Zone, north-central Norway: An  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  record of Early Devonian -Early Carboniferous ductile extension and unroofing*. Norges Geologiske Tidsskrift.
- Ettensohn, F. R. og Brett, C. E. (1988). *Stratigraphic evidence from the Appalachian Basin for continuation of the Taconian orogeny into Early Silurian time*. Geology.
- Fabian, C. (1990). *Petrographic und strukturelle Untersuchungen an Ortho- und Paragesteinen im Bereich der Marginalsynklinae zwischen dem Rödliheia- und Sausfjell-Diapir in der Helgelanddecke, Nordland/Norwegen*. Technische Universität Clausthal.
- Fejerskov, M., Lindholm, C. D., Myrvang, A. og Bungum, H. (2000). *Crust stress in and around Norway; a compilation of in situ stress observations.; Dynamics of the Norwegian margin*. Geological Society Special Publications.
- Fossen, H. og Dallmeyer, R. (1998).  *$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  muscovite dates from the nappe region of southwestern Norway: dating extensional deformation in the Scandinavian Caledonides*. University of Georgia.
- Fossen, H. og Dunlap, J. W. (1998). *Timing and kinematics of Caledonian thrusting and extensional collapse, southern Norway: evidence from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  thermochronology*. Journal of Structural Geology. The Australia National University.
- Fossen, H. (2019). *Platetektonikk*. Hentet 12. oktober 2019, fra <https://snl.no/platetektonikk>
- Griffin, W. L., Austrheim, H., Brastad, K., Bryhni, I., Krill, A. G., Krough, E., Mørk, M. B., Qvale, H. og Tørudbakken, B. (1985). *High-pressure metamorphism in the scandinavian caledonides*. Mineralogisk-Geologisk Museum.
- Grimstad, E. og Barton, N. (1993). *Updating of the q-system for NMT*. International Symposium on Sprayed Concrete.

- Grøv, E. (2017). *BERGARTENES ELASTISITET OG STYRKE*. Norges Tekniske og Naturvitenskapelige Universitet.
- Grøv, E. og Holmøy, K. H. (2000). *Underjordsanlegg Akselberg - Vurdering av bergspenningsmålinger og lengde strosserom*. O. T. Blindheim AS.
- Gustavson, M. (1975). *The Low-grade Rocks of the Skålvær Area, S. Helgeland, and Their Relationship to High grade Rocks of the Helgeland Nappe Complex*. Norges Geologiske Undersøkelse.
- Gustavson, M. (1981). *Mosjøen berggrunnsgeologisk kart M 1:250 000*. Norges Geologiske Undersøkelse.
- Gustavson, M. (1988). *Mosjøen berggrunnsgeologisk kart M 1:250 000 beskrivelse*. Norges Geologiske Undersøkelse.
- Hagen, S. A. (2018). *Bergspenningsmålinger - Presentasjon*. SINTEF.
- Harraz, H. (2015). *Underground mining methods – Room and pillar method*. Hentet 12. oktober 2019, fra <http://www.slideshare.net/hzharraz/room-and-pillar-mining-method>
- Hoek, E. og Brown, E. T. (1980). *Underground Excavations in Rock*. Geotech.Engng Div.
- Hoek, E. og S.Diederichs, M. (2006). *Empirical estimation of rock mass modulus*. Elsevier.
- Horne, R. og Culshaw, N. (2001). *Flexural-slip folding in the Meguma Group, Nova Scotia, Canada*. Elsevier.
- Jansen, J. (2017). *Spring Theory*. Hentet 27. januar 2020, fra <http://www.tsbengineering.com/jorgen/2018/1/25/spring-theory>
- Krabbendam, M. og Dewey, J. F. (1998). *Exhumation of UHP rocks by transtension in the Western Gneiss Region, Scandinavian Caledonides*. Geological Society London Special Publications.
- Krill, A. G. og Zwaan, K. B. (1988). *Reinterpretation of Finnmarkian deformation on western Sørøya, northern Norway: a reply*. Norsk Geologisk tidsskrift.
- Li, C. (2018). *Rock Mechanics (TGB 4210 Compendium)*. NTNU, Trondheim.
- Lieham, M. og Bruhn, D. (1988). *Kartierbericht zum kartierkurs III in Norwegen*. Technische Universität Clausthal.
- Lilleøren, K. (2018). *Elv*. Hentet 15. oktober 2019, fra <https://snl.no/elv>
- Løseth, H. (1985). *The tectonostratigraphic development of the Nevernes area, Velfjord part 1 2*. Geologiske Institut UiB.
- Marinos, P. G., Marinos, V. og Hoek, E. (2007). *THE GEOLOGICAL STRENGTH INDEX (GSI): A CHARACTERIZATION TOOL FOR ASSESSING ENGINEERING PROPERTIES FOR ROCK MASSES*. Taylor; Francis Group.

- Mckerrow, W., Niocaill, C. M. og Dewey, J. (2000). *The Caledonian Orogeny redefined*. Journal of the Geological Society.
- Myrland, R. (1972). *Velfjord. Beskrivelse til det berggrunnsgeologiske gradteigskart I 18 - 100 000*. Norges Geologiske Undersøkelse.
- Myrvang, A. (2001). *Bergmekanikk*. Norges Tekniske og Naturvitenskaplige Universitet.
- NGI. (2015). *Håndbok - Q-system*. Norges Geotekniske Institutt.
- NGU. (2015). *Active plate boundaries*. Hentet 12. oktober 2019, fra <https://www.ngu.no/en/topic/active-plate-boundaries>
- Nilsen, B. (2003). *Vurdering av stabilitetsforhold i Akselbergdagbrudd basert på befaring 19. september 2003*. SINTEF.
- Nilsen, B. (2008). *Akselberg dagbrudd – vurdering av stabilitetsforhold basert på befaring 30. juni 2008*. SINTEF.
- Nilsen, B. (2016). *Ingeniørgeologi-Berg Grunnkurs*. Norges Tekniske-Naturvitenskapelige Universitet.
- Nilsen, B. (2018). *Sprekkekartlegging Akselberg dagbrudd*. Brønnøy Kalk AS.
- Nilsen, B. og Palmstrøm, A. (2000). *Engineering Geology and Rock Engineering I geology*. Norsk Bergmekanikkgruppe.
- Nordgulen, Ø., Barnes, C. G., Yoshinobu, A. S., Frost, C., Prestvik, T., Austrheim, H., Anderson, H. S., Marko, W. T. og McArthur, K. (2008). *Pre-Scandian tectonic and magmatic evolution of the Helgeland Nappe Complex, Uppermost Allochthon*. 33 IGC, The Nordic Countries.
- Nordgulen, Ø., Braathen, A., Corfu, F., Osmundsen, P. T. og Husmo, T. (2002). *Polyphase kinematics and geochronology of the late Caledonian Kollstraumen detachment, north-central Norway*. Norwegian Journal of Geology.
- Nordgulen, Ø. og Schouenborg, B. (1990). *The Caledonian Heilhornet Pluton, north-central Norway: geological setting, radiometric age and implications for the Scandinavian Caledonides*. Norwegian Journal of Geology.
- Oliver, G. J. (2001). *Reconstruction of the Grampian episode in Scotland: its place in the Caledonian Orogeny*. Elsevier.
- Palmström, A. (2005). *Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD)*. Tunnelling; Underground Space Technology.
- Phillips, F. C. (1971). *The use of stereographic projection in structural geology*. Edward Arnold, London.

- Ramberg, I. B., Nøttvedt, A. og Bryhni, I. (2006). *Landet blir til - Norges Geologi*. Norsk Geologisk Forening.
- Rehnström, E. F., Corfu, F. og Torsvik, T. H. (2002). *Evidence of a Late Precambrian (637 Ma) Deformational Event in the Caledonides of Northern Sweden*. The Journal of Geology.
- Robert, D. og Gee, D. G. (1985). *An introduction on the structure of the Scandinavian Caledonides*. In Gee, D.G. Sturt, BA (eds.) *The Caledonide Orogen - Scandinavia and related areas*. John Wiley Sons, Chichester.
- Roberts, D. (1997). *Grong berggrunnskart 1:250 000*. Norges Geologiske Undersøkelse.
- Roberts, D. (1988). *The terrane concept and the Scandinavian Caledonides: a synthesis*. Norges Geologiske Undersøkelse.
- Roberts, D. (2003). *The Scandinavian Caledonides: event chronology, palaeogeographic settings and likely modern analogues*. Norges Geologiske Undersøkelse.
- Roberts, D. (2007). *Palaeocurrent data from the Kalak Nappe Complex, northern Norway: A key element in models of terrane affiliation*. Norsk Geologisk Tidsskrift.
- Rowland, S. M., Duebendorfer, E. M. og Schiefelbein, I. M. (2007). *Structural Analysis and Synthesis: A Laboratory Course in Structural Geology 3rd Edition*. Wiley Blackwell.
- Rüffer, T. (1988a). *Geological mapping of the Velfjord (1:50 000) map sheet Helgeland Nappe, Nordland, Norway. Interim report*. Technische Universität Clausthal.
- Rüffer, T. (1988b). *Geological mapping of the Velfjord (1:50 000) map sheet Helgeland Nappe, Nordland, Norway. Second interim report*. Technische Universität Clausthal.
- Rüffer, T. (1988c). *Geologische Untersuchungen im zentralen westlichen Teil der Helgelanddecke, Kaledonien, Nordland/Norwegen - Geological investigation in the central western part of Helgeland Nappe, Nordland, Norway*. Technische Universität Clausthal.
- Rüffer, T. (1988d). *Petrographic und strukturelle Untersuchungen an metamorphen und Magmatiten zwischen dem Gröndalen und der Rödli-Monzodiorit-Intrusion, Helgelanddecke, Kaledonien, Nordland/Norwegen*. Technische Universität Clausthal.
- Sandøy, R. (2003). *The geometry, internal structure and geochemical of industrial mineral marble deposits in the Velfjord Area*. Norges teknisk-naturvitenskapelig universitet.
- SINTEF. (1997a). *Sintef testrapport: E-modul, Poissons forhold, enakset trykkfasthet*. SINTEF.
- SINTEF. (1997b). *Testrapport Engadalen*. SINTEF.
- SINTEF. (1999). *Testrapport Forbergskog - Akselberg*. SINTEF.
- SINTEF. (2000). *Sintef rapport: Bergspenningsmålinger ved Akselberg, Velfjord*. SINTEF.



- Slagstad, T. (2006). *Chemical (U–Th–Pb) dating of monazite: Analytical protocol for a LEO 1450VP scanning electron microscope and examples from Rogaland and Finnmark, Norway*. Norges Geologiske Undersøkelse.
- Svenningsen, O. (2001). *Onset of seafloor spreading in the Iapetus Ocean at 608 Ma: precise age of the Sarek Dyke Swarm, northern Swedish Caledonides*. Elsevier.
- Thorsnes, T. (1985). *The tectonostratigraphic development of the Nordgjøllmark area. S. Nordland*. Geologiske Institut UiB.
- Thorsnes, T. og Løseth, H. (1991). *Tectonostratigraphy in the Velfjord-Tosen region, southwestern part of the Helgeland Nappe Complex, Central Norwegian Caledonides*. Norges Geologiske Undersøkelse.
- Trinh, Q. N., Holmøy, K. H., Larsen, T. E. og Myrvang, A. (2016). *Continued rock stress and displacement measurements combined with numerical modeling as an active, realistic rock engineering tool*. NTNU, Trondheim.
- Tøgersen, M. K. (2011). *En petrologisk og geokjemisk studie av pegmatittisk og aplittiske intrusjoner i marmor på Akselberg, Brønnøy kommune, Nordland*. Norges Tekniske Naturvitenskapelig Universitet.
- vegvesen, S. (2010). *Geologi - E18 Bommestad-Sky. Larvik kommune i Vestfold. Geologisk rapport for Reguleringsplan. Alt. 3Z*. Statens vegvesen.
- vegvesen, S. (2011). *E6-12 TUNNEL VED REINFORSHIEIA I RANA KOMMUNE. INGENIØRGEOLOGISK RAPPORT TIL DETALJREGULERINGSPLAN*. Statens vegvesen.
- Wang, F., Li, X., Couples, G., Shi, J., Zhang, J., Tepinhi, Y. og Wu, L. (2014). *Stress arching effect on stress sensitivity of permeability and gas well production in Sulige gas field*. Elsevier.
- Watne, T. (2001). *Geological variations in marble deposits - Implication for the mining of raw material ground calcium carbonate slurry products*. Norges Tekniske Naturvitenskapelig Universitetl.
- Weil, A. B., der Voo, R. V., Niocaill, C. M. og Meert, J. G. (1997). *The Proterozoic supercontinent Rodinia*. Earth; Planetary Science Letters.
- Yoshinobu, A. S., Barnes, C. G., Nordgulen, Ø., Prestvik, T., Fanning, M. og Pedersen, R. (2002). *Ordovician magmatism, deformation, and exhumation in the Caledonides of central Norway: An orphan of the Taconic orogeny?* Geological Society of America.

## A Teori

### A.1 Q-metoden

Q-systemet er utviklet av NGI på tidlig 1970-tallet (Barton mfl., 2007). Etter at Q-systemet har blitt introdusert har det vært en betydelig utvikling i både teknologi- og sikringsfilosofi innen utbyggingen av underjords bergrom. Siden den gang har metoden blitt modifisert og det er gjentatte ganger foretatt oppdateringer basert på erfaringer fra både Norge og utlandet (Grimstad og Barton, 1993).

Q-systemet er en klassifiseringsmetode for bergmasser med hensyn til stabilitet av bergrom. Metoden kan benyttes for å klassifisere bergmasser på dagen så vel som rundt bergrommet. Q-metoden er avhengig av underjordsanleggets overdekning, og er ikke en uavhengig karakterisering av bergmassen. Bergmassens uforstyrrede verdi kan derfor variere fra det som blir estimert på stoff. Basert på seks forskjellige parametere estimeres Q-verdien for bergmassen. De forskjellige Q-verdiene relateres til forskjellige typer permanent sikring gjennom et skjematisk diagram. I praksis betyr dette ved å finne Q-verdien, er det mulig å finne type bergsikring og mengde sikring som kan benyttes. Dette er som nevnt tidligere basert på tidligere erfaringer (NGI, 2015).

Referansetilfellene kommer fra kombinasjoner med både oppsprukket- og hardt intakt berg. Det er få eksempler for svake bergarter med ingen eller få brudd. Vurdering av bergsikring ved slike tilfeller bør andre metoder benyttes, i tillegg til Q-metoden. For slike tilfeller kan det være lurt å kombinere bruken av Q-metoden med analytiske verktøy og deformasjonsmålinger. Dette spesielt for der Q-verdien er mindre enn 1 for svake berg og skviseberg. Denne metoden er basert på tidligere erfaringer, empirisk. Dette betyr at sikringsdiagrammene er konservative i forhold til angitt stabilitetssikringsbehov (NGI, 2015).

Ved hjelp av følgende formel kan Q-verdien estimeres (NGI, 2015;

$$Q = \frac{RQD}{J_n} X \frac{J_r}{J_a} X \frac{J_w}{SRF} \quad (14)$$

Her er:

Q : Q-verdien

RQD : Oppsprekkingstallet (Rock Quality Designation)

$J_n$  : Tall for sprekkesett

$J_r$  : Sprekkeruhetstall

$J_a$  : Tall for sprekkefylling

$J_w$  : Sprekkevannstall

SRF : Spenningsfaktor (Stress Reduction Factor)

Delkapitlene nedenfor tar for seg en kort beskrivelse av de seks ulike parametrene som benyttes ved estimering Q-verdien.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} X \frac{J_r}{J_a} X \frac{J_w}{SRF} \quad (15)$$

Her er:

Q : Q-verdien

RQD : Oppsprekkingstallet (Rock Quality Designation)

$J_n$  : Tall for sprekkesett

$J_r$  : Sprekkeruhetstall

$J_a$  : Tall for sprekkefylling

$J_w$  : Sprekkevannstall

SRF : Spenningsfaktor (Stress Reduction Factor)

### **Oppsprekkingstallet, RQD**

Rock Quality Designation som blir forkortet til RQD ble definert av Deere (Deere, 1963). RQD er et enkelt klassifiseringssystem for bergmasser, der det deles inn i 5 klasser. Disse er listet i tabellen i Figur A.1.

1 RQD = Oppsprekkingsfaktor (Rock Quality Designation)			RQD
A	Svært dårlig	(> 27 sprekker per m <sup>3</sup> )	0-25
B	Dårlig	(20-27 sprekker per m <sup>3</sup> )	25-50
C	Middels	(13-19 sprekker per m <sup>3</sup> )	50-75
D	God	(8-12 sprekker per m <sup>3</sup> )	75-90
E	Utmerket	(0-7 sprekker per m <sup>3</sup> )	90-100
Merk: i) Der RQD er rapportert eller målt til ≤ 10 (inklusive 0), brukes verdien 10 for å bestemme Q-verdien ii) RQD-intervaller på 5, dvs. 100, 95, 90, osv., er tilstrekkelig nøyaktige			

Figur A.1: Tabellen viser hvordan estimere RQD til bergmasser ved å se på antall sprekker per kubikkmeter. Tabellen er hentet fra NGI, 2015

RQD-verdien kan også fortelle prosentantallet av intakt berg fra en meter lang kjerneprøve som er større enn 10cm. RQD-verdien vil derfor være 1-100 %. 0 kan ikke brukes i formel (8), derfor forhøyes verdier som ligger mellom 0-10 til 10 når Q-verdien skal estimeres.

I bergrom er det mulig å få et tredimensjonalt bilde av bergmassen og dens sprekker. Dette gjør at en kan anslå sprekker per kubikkmeter ganske så nøyaktig. Følgende sammenheng er gitt for sprekker per kubikkmeter og RQD (Palmström, 2005);

Formel:

$$RQD = 110 - 2,5 * J_v \quad (16)$$

RQD : Oppsprekkingstallet

$J_v$  : Antall sprekker per kubikkmeter

### Sprekkesett, $J_n$

Sprekkegeometrien påvirker størrelsen og formen på blokkene i en bergmasse. Det bør vurderes hvor stor grad disse sprekke påvirker stabiliteten til bergrommet. Sprekkene i et sprekkese sett er tilnærmet parallelle i forhold til hverandre, og har en karakteristisk avstand. Det finnes også sprekker som ikke fremtrer systematisk eller har en avstand i forhold til hverandre på flere meter. Slike sprekker kalles tilfeldige sprekker (NGI, 2015). Tall for sprekkese sett er listet i tabellen i Figur A.2.

2 $J_n =$ Tall for sprekkeseff		$J_n$
A	Massivt, ingen eller få sprekker	0,5-1,0
B	Ett sprekkeseff	2
C	Ett sprekkeseff pluss tilfeldige sprekker	3
D	To sprekkeseff	4
E	To sprekkeseff pluss tilfeldige sprekker	6
F	Tre sprekkeseff	9
G	Tre sprekkeseff pluss tilfeldige sprekker	12
H	Fire eller flere sprekkeseff, tilfeldig og sterkt oppsprukket "sukkerbitberg", osv.	15
J	Knust berg, jordaktig	20
Merk: i) For tunnelkryss, bruk $3 \times J_n$ ii) For pøthug, bruk $2 \times J_n$		

Figur A.2: Tabellen viser hvordan estimere sprekkeseff basert på tilfeldige sprekker og sprekkeseff. Tabellen er hentet fra NGI, 2015

### Sprekkruhetstall, $J_r$

Sprekkruhetstallet beskriver sprekkflatens karakter, om den er glatt, ru, plan eller bølget. Basert på disse forholdene estimeres det en sprekkruhetstall fra tabellen i figur. Sprekkbeskrivelsen er basert på ruheter i to skalaer (NGI, 2015);

- Glatt, ru og sidespeil henviser til små strukturer i millimeter- til centimeterskala. Her kan det benyttes en finger som kan føres langs sprekkflaten, der småskala av ruhet estimeres.
- Den andre skalaen er av større størrelsesorden, fra desimeter- til meterskala. Her ønskes det å finne amplituden til storskalaruheten.

Figur A.3 benyttes til å estimere  $J_r$ .

3 $J_r =$ Sprekkeruhetstall		$J_r$
<b>a) Bergveggkontakt, og</b> <b>b) Bergveggkontakt før skjærbevegelsen har gått 10 cm</b>		
A	Diskontinuierlige sprekker	4
B	Ru eller ujevn, bølgete	3
C	Glatt, bølgete	2
D	Glidespeil, bølgete	1,5
E	Ru, ujevn, plan	1,5
F	Glatt, plan	1
G	Glidespeil, plan	0,5
Merk: i) Beskrivelse henviser til småskalaegenskaper og mellomskalaegenskapet, i den rekkefølgen		
<b>c) Ingen bergkontakt ved skjærbevegelse</b>		
H	Sone som inneholder leirfylling tykk nok til å forhindre bergkontakt ved skjærdeformasjon	1
Merk: ii) Legg til 1 hvis gjennomsnittlig avstand i det relevante sprekkesettet er mer enn 3 m (avhenger av størrelsen på tunnelåpningen) iii) $J_r = 0,5$ kan brukes for plane glidespeil med lineasjon, forutsatt at lineasjonen er orientert i sannsynlig bevegelsesretning		

Figur A.3: Tabellen viser hvordan estimere for sprekkeuhet. Tabellen er hentet fra NGI, 2015

### Sprekkfylling, $J_a$

Sprekkfyllingen er avgjørende for friksjonen langs sprekken. Når det kommer til sprekkfylling deles det inn i to faktorer; tykkelse og styrke. Disse to faktorene er avhengig av mineralsammensetningen til sprekkfyllingen. Det deles så videre i tre kategorier (NGI, 2015);

- a) Bergkontakt
- b) Bergkontakt før 10cm skjærdeformasjon
- c) Ingen bergkontakt ved skjærdeformasjon

Figur A.4 viser hvordan estimere sprekkfyllingstallet  $J_a$ .

4 $J_a$ = Tall for sprekketylling		$\Phi_r$	$J_a$
<b>a) Bergkontakt (ingen mineralfylling, bare belegg)</b>			
A	Sammenvokste sprekker med harde mineraler som kvarts eller epidot.		0,75
B	Uomvandlede sprekkeflater; bare overflateoksidasjon.	25-35°	1
C	Svakt omvandlede sprekkeflater. Uoppbløtelig mineralbelegg, sandpartikkel, oppknust berg uten leir.	25-30°	2
D	Siltig eller sandig sprekkebelegg, litt leir (ikke svellende).	20-25°	3
E	Oppbløtelig leirbelegg med lav friksjon, f.eks. kaolinit eller glimmer. Også kloritt, talk, gips, grafit osv. og små mengder sveleleire.	8-16°	4
<b>b) Bergkontakt før 10 cm skjærdeformasjon (tynn mineralfylling)</b>			
F	Sandige partikkel; oppknust berg, ikke leir.	25-30°	4
G	Sterkt overkonsolidert, uoppbløtelig fylling av leirmineraler; (kontinuerlig, men <5 mm tykkelse).	16-24°	6
H	Middels eller litt overkonsolidert fylling av oppbløtelig leirmateriale (kontinuerlig, men <5 mm tykkelse).	12-16°	8
J	Fylling av sveleleire, dvs. montmorillonitt (kontinuerlig, men <5 mm tykkelse). $J_a$ -verdien avhenger av prosentvis innhold av sveleleire.	6-12°	8-12
<b>c) Ingen bergkontakt ved skjærdeformasjon (tykk mineralfylling)</b>			
K	Soner og bånd av desintegret eller knust berg. Sterkt overkonsolidert, uoppbløtelig fylling.	16-24°	6
L	Soner og bånd av knust eller desintegret berg og leir. Middels til litt overkonsolidert uoppbløtelig fylling.	12-16°	8
M	Soner og bånd av leir eller knust eller desintegret berg. $J_a$ -verdien avhenger av prosentvis innhold av sveleleire.	6-12°	8-12
N	Tykke kontinuerlige soner eller bånd med leir. Sterkt overkonsolidert.	12-16°	10
O	Tykke kontinuerlige soner eller bånd med leir. Middels-til-lav overkonsolidering	12-16°	13
P	Tykke kontinuerlige soner eller bånd med leir. Sveleleire. $J_a$ avhenger av prosentvis innhold av sveleleire.	6-12°	13-20

Figur A.4: Tabellen viser hvordan estimere for sprekkfyllingstallet. Tabellen er hentet fra NGI, 2015

### Sprekkvannstallet, $J_w$

Vanninnstrømming langs bergsprekker vil føre til bløte og utskylning av mineralfylling, noe som resulterer med å redusere friksjonen langs sprekkflaten. Vanntrykk kan være med på redusere normalspenningen på sprekkoverflaten, noe som virkes desstabiliserende på blokker i tak og vegger, og øker faren for utglidninger av blokker. Sprekkvannstallet estimeres basert på grunnlag av vann-

trykk og innlekkasjer NGI, 2015. Dette er vist i Figur A.5.

5 $J_w =$ Sprekkvannstall		$J_w$
A	Tørre bergrom eller mindre innslg (fuktig eller noen få drypp)	1,0
B	Middels innslg, av og til utvasking av sprekketyllinger (mange drypp/"regn")	0,66
C	Vannstråler eller høyt trykk i kompetent berg med utlyte sprekker	0,5
D	Stort tilslg eller høyt trykk, betydelig utvasking av sprekketyllinger	0,33
E	Usedvanlig høy innstrømming eller vanntrykket avtar med tid. Forårsaker utvasking av materialer og kanskje utrasinger	0,2-0,1
F	Usedvanlig høy innstrømming eller vanntrykket fortsetter uten merkbar reduksjon. Forårsaker utvasking av materialer og kanskje utrasinger	0,1-0,05
Merk: i) Faktorene C til F er grove estimater. Øk $J_w$ hvis berget dreneres eller det utføres injeksjon ii) Spesielle problemer forårsaket av isdannelse er ikke tatt med i betraktning		

Figur A.5: Tabellen viser hvordan estimere for sprekkvannstallet. Tabellen er hentet fra NGI, 2015

### Spenningsfaktor, SRF

SRF som står for Stress Reduction Factor, beskriver forholdet mellom bergstyrken og bergspenninger som er omringet av bergrom. Spenningenes effekt kan observeres i form av avskalling, deformasjon, skvising, bergslag, skvising, dilatans og blokkutgliding. Observasjon av slike virkninger kan ta tid. Bergmassens styrke og spenninger kan måles basert på tester utført i felt eller på laboratorium. Basert på bergartens enaksiale trykkfasthet og største hovedspenning eller forholdet mellom maksimal tangentialspenning og enaksiale trykkfasthet i massivt berg. Før utgravingen startes kan SRF estimeres basert på overdekningen og topografiske egenskaper eller av erfaring fra tilsvarende prosjekter med like geologiske og geografiske forhold. Før estimeringen av SRF-verdien må kategori med hensyn til spenningssituasjonen fastlås. Dette er inndelt i fire kategorier og beskrevet i tabellen i Figur A.6.



6 SRF = Spenningsfaktor (Stress Reduction Factor)			SRF	
<b>a) Svakhetssoner som krysser tunnelen eller bergrommet, som kan føre til at bergmasse løsner</b>				
A	Hyppig oppreden av svakhetssoner som inneholder leire eller kjemisk forvitret berg, avspent berg (uansett dybde), eller lange seksjoner med Inkompetent (svakt) berg (uansett dybde). For skivling, se 6L og 6M		10	
B	Flere skjærsoner innenfor en kort seksjon i kompetent avspent sideberg (uansett dybde)		7,5	
C	Enkeltstående svakhetssoner med eller uten leire eller kjemisk forvitret berg (dybde $\leq$ 50 m)		5	
D	Ukonsoliderte, åpne sprekker, mange sprekker eller "sukkerbit", osv. (uansett dybde)		5	
E	Enkeltstående svakhetssoner med eller uten leire eller kjemisk forvitret berg (dybde $>$ 50 m)		2,5	
Merk: i) Reduser disse SRF-verdiene med 25-50 % hvis svakhetssonene bare påvirker men ikke krysser den underjordiske åpningen				
<b>b) Kompetent, hovedsakelig massivt berg, spenningsproblemer</b>		$\sigma_c / \sigma_1$	$\sigma_1 / \sigma_c$	SRF
F	Lave spenninger, nær overflaten, åpne sprekker	$>200$	$<0,01$	2,5
G	Middels spenninger, gunstige spenningsforhold	200-10	0,01-0,3	1
H	Høye spenninger, svært tett struktur. Vanligvis gunstig for stabiliteten. Kan også være ugunstig for stabiliteten, avhengig av retningen på spenningene sammenliknet med sprekke dannelse/svakhetsplan*	10-5	0,3-0,4	0,5-2 2-5*
J	Moderat avskalling etter $>$ 1 time i massivt berg	5-3	0,5-0,65	5-50
K	Avskalling og bergslag etter noen minutter i massivt berg	3-2	0,65-1	50-200
L	Intens bergslag og umiddelbar dynamisk deformasjon i massivt berg	$<2$	$>1$	200-400
Merk: i) For sterkt anisotropiske urerte spenningsfelt (om målt): når $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$ , reduser $\sigma_c$ til $0,75 \sigma_c$ . Når $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$ , reduser $\sigma_c$ til $0,5 \sigma_c$ , der $\sigma_c$ = fri trykkestyrke, $\sigma_1$ og $\sigma_3$ er de primære og sekundære spenningene, og $\sigma_1$ = maksimum tangential spenning (estimert fra elastisk teori)				
ii) Når dybden av hengsel under overflaten er mindre enn spennet, foreslås det at SRF økas fra 2,5 til 5 for slike tilfeller (se F)				
<b>c) Skivseberg: plastisk deformasjon i ikke kompetent berg under påvirkning av høyt trykk</b>		$\sigma_1 / \sigma_c$	SRF	
M	Moderat skivsende bergtrykk	1-5	5-10	
N	Intens skivsende bergtrykk	$>5$	10-20	
Merk: iv) For bestemmelse av skivsende bergforhold henvises til relevant litteratur (dvs. Singh et al. 1992 og Bhasin og Grimstad, 1996)				
<b>d) Svellende berg: kjemisk sveleaktivitet ved tilgang på vann</b>			SRF	
O	Moderat swelling		5-10	
P	Intens swelling		10-15	

Figur A.6: Tabellen viser hvordan estimere SRF. Tabellen er hentet fra NGI, 2015

## A.2 Stereografisk projeksjon

Sprekkeroser er et meget godt verktøy som kan benyttes ved å finne gunstige orienteringer av bergrommet som skal utbygges. Problemet med sprekkeroser er at det ikke gir gode nok detaljer om fallmålingene til de forskjellige sprekkesettene. Det vil derfor lønne seg å benytte seg av stereografisk projeksjon (Phillips, 1971).

Stereografisk projeksjon av sprekker, sprekkesett og svakhetssoner er til stor hjelp ved å løse struktureologiske problemer. Ved å plote strøk- og fallmålinger på et stereonett kan en få oversikt over vinkel og orientering av de forskjellige sprekkenes og svakhetssonene. Dette kan videre benyttes til stabilitetsanalyser (Phillips, 1971).

For å kunne utføre en analyse av sprekker og svakhetssoner er det viktig å foreta passe mengde med målinger av strøk- og fall. Ved å foreta konturplott av dette kan det bli uoversiktlig. Det er derfor en stor fordel å plote polene. Dette gjør det lettere å foreta stabilitetsanalyser (Phillips, 1971).

### A.3 Strukturgeologi

Dette er en grunnleggende introduksjon til strukturgeologi som tar for seg ulike former og begreper som blir brukt i dette feltet.

#### A.3.1 Antiform og synform

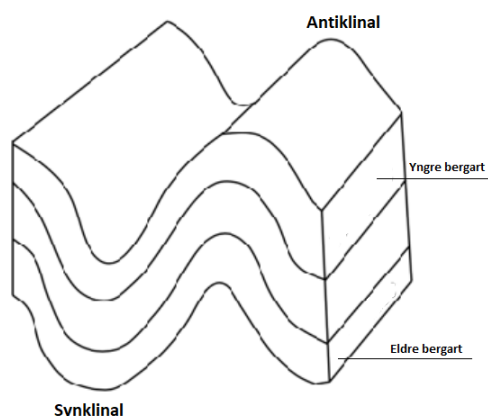


Figur A.7: En forenklet illustrasjon av antiform og synform. Figuren er hentet fra (Rowland mfl., 2007) og modifisert i Adobe Illustrator.

Antiform: Dette er når en fold som lukker seg oppover uavhengig av stratigrafi.

Synform: Dette er det motsatte av antiform, der en fold lukker seg nedover. I likehet med antiform er den uavhengig av stratigrafi.

#### A.3.2 Antiklinal og synklinal

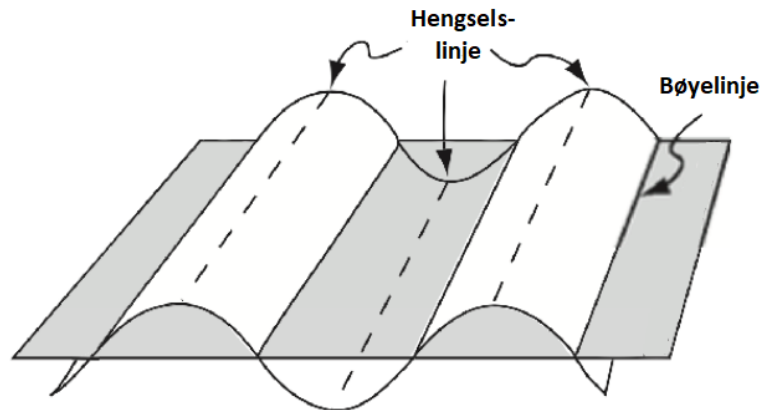


Figur A.8: En illustrasjon av antiklinal og synklinal. Figuren er hentet fra (Rowland mfl., 2007) og modifisert i Adobe Illustrator.

Synklinal: Dette er når laget med yngste bergarten befinner seg i midten og laget med eldste bergarten befinner seg ytterst av folden.

Antiklinal: Dette er når laget med eldste bergarten befinner seg i midten og laget med yngste bergarten befinner seg ytterst av folden.

### A.3.3 Hengselslinje og bøyelinje



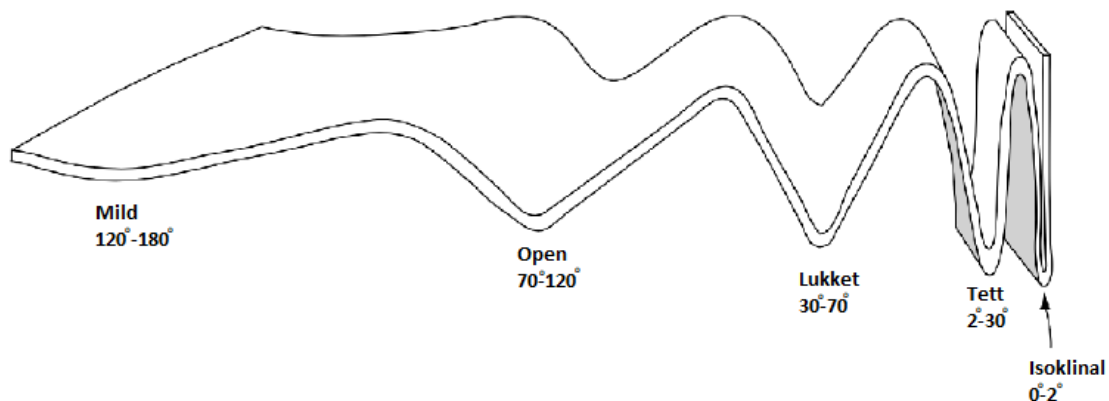
Figur A.9: En illustrasjon av hengsels- og bøyelinjen. Figuren er hentet fra (Rowland mfl., 2007) og modifisert i Adobe Illustrator.

Foldeaksen: Der alle tiltenkte linjer som er parallelle med hengselslinjer.

Hengselslinjer: Der to foldearmer møtes. Dette er der ombøyingen av laget når amplituden.

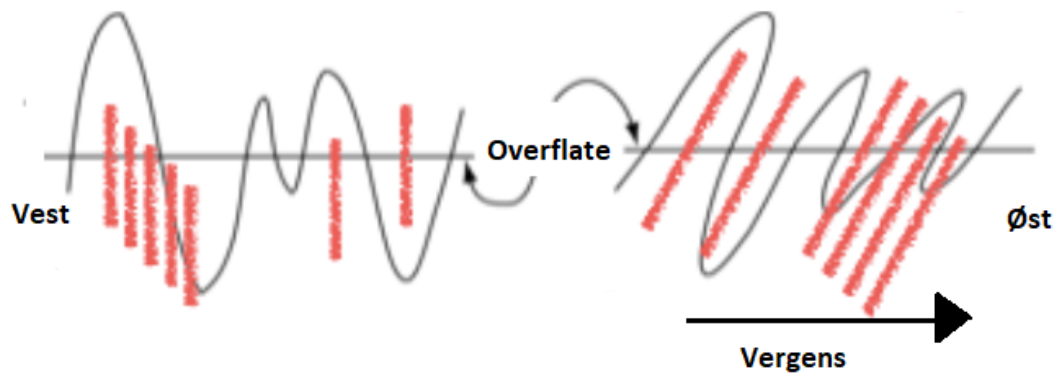
Bøyelinjen: Dette er overgangen av fra synform til antiform eller omvendt.

### A.3.4 Foldningsvinkler



Figur A.10: Plane lag som blir utsatt for kompresjon resulterer med foldning av laget. Foldningsvinkelen utgjør vinkelen mellom to foldearmer, der det deles inn i fem ulike; mildfold, openfold, lukketfold, tettfold og isoklinalfold. Figuren er hentet fra (Rowland mfl., 2007) og modifisert i Adobe Illustrator. (Rowland mfl., 2007).

## A.3.5 Vergens



Figur A.11: Begge foldningen har varierende amplitude, der den til venstre er symmetrisk- og den til højre er asymmetrisk fold. Foldningen til højre har en vergens mot øst. Figuren er hentet fra (Rowland mfl., 2007) og modifisert i Adobe Illustrator.

## B Geologi

### B.1 Den kaledonske fjellkjeden

#### B.1.1 Forslag til ulike faser i Den kaledonske fjellkjededannelsen

Tektonisk fase	Område	Kollisjonstype	Når [Ma]
Finnmarks	Nord-Norge	Ark-Baltika	500 - 478
Penobscotian	New England - Newfoundland	Ark-Avalonia	490 - 485
Grampian	Scottish Highland	Ark - Laurentia	480 - 465
Hunberian	Vestlig Highland	Ark - Kontinent	480 - 455
Taconian	Maritimes - New England	Ark - Laurentia	480 - 440
Shelveian	Wales	Avalanoni - Baltika	450 - 440
Scandian	Skandinavia - Skottland	Laurentia - Baltika	450 - 440
Acadian	Nord Appalachian - Sør England	Meguma - Laurentia	400 - 385

Tabell 20: En oversikt over forslag til ulike faser i Den kaledonske fjellkjededannelsen (Mckerrow mfl., 2000), (Horne og Culshaw, 2001), (Thorsnes og Løseth, 1991), (Oliver, 2001 og (Ettensohn og Brett, 1988) referert i (Sandøy, 2003).

### B.2 De resterende tre Alloktonene

#### B.2.1 Nedre allokton

Nedre allokton er skyvedekker som er fullstendig løsrevet fra sitt opphavssted, men har en relativt kort transportlengde, noen titalls kilometer. Skyvedekkkene består i hovedsak av sen-proterozoisk (fra tiden før kontinentalkollisjonen fant sted) til kambrosiluriske sedimentære avsetninger på den baltiske grensen (Ramberg mfl., 2006) og noe prekambrisk grunnfjell. Innholdsmengden av pre-kambrisk grunnfjell øker i mengde mot vest (Sandøy, 2003). Bergartene er deformert og lav- til middelgrads metamorfisert, der en kan finne metasedimentære bergarter som skifer, gråvakke, kvartsitt og kalkstein (Ramberg mfl., 2006).

#### B.2.2 Midtre allokton

Strukturelt befinner midtre allokton seg over nedre allokton. Midtre allokton består av kontinentale skyvedekker, som representerer baltiske randen. Dekket består av såkalte grunnfjellsøyer eller

mikrokontinenter som kan ha eksistert i Iaputushavet mellom Laurentia og Baltika. Bergartene her består av grunnfjellsenheter med eller uten sen-proterozoisk til kambrosiluriske sedimentære avsetninger fra den baltiske grensen. Midtre alloktonen består av høyere grad prekambrisk grunnfjell sammenlignet med nedre allokton (Ramberg mfl., 2006). Bergartene her har også en større omdanningsgrad enn dekket under, og består av en tykk sekvens av metasedimentære bergarter. Øvre deler av midtre allokton er en karakteristikk av bergarter som dioritt og doloritt, som stammer fra pretektoniske intrusjoner (Sandøy, 2003) og (Tøgersen, 2011).

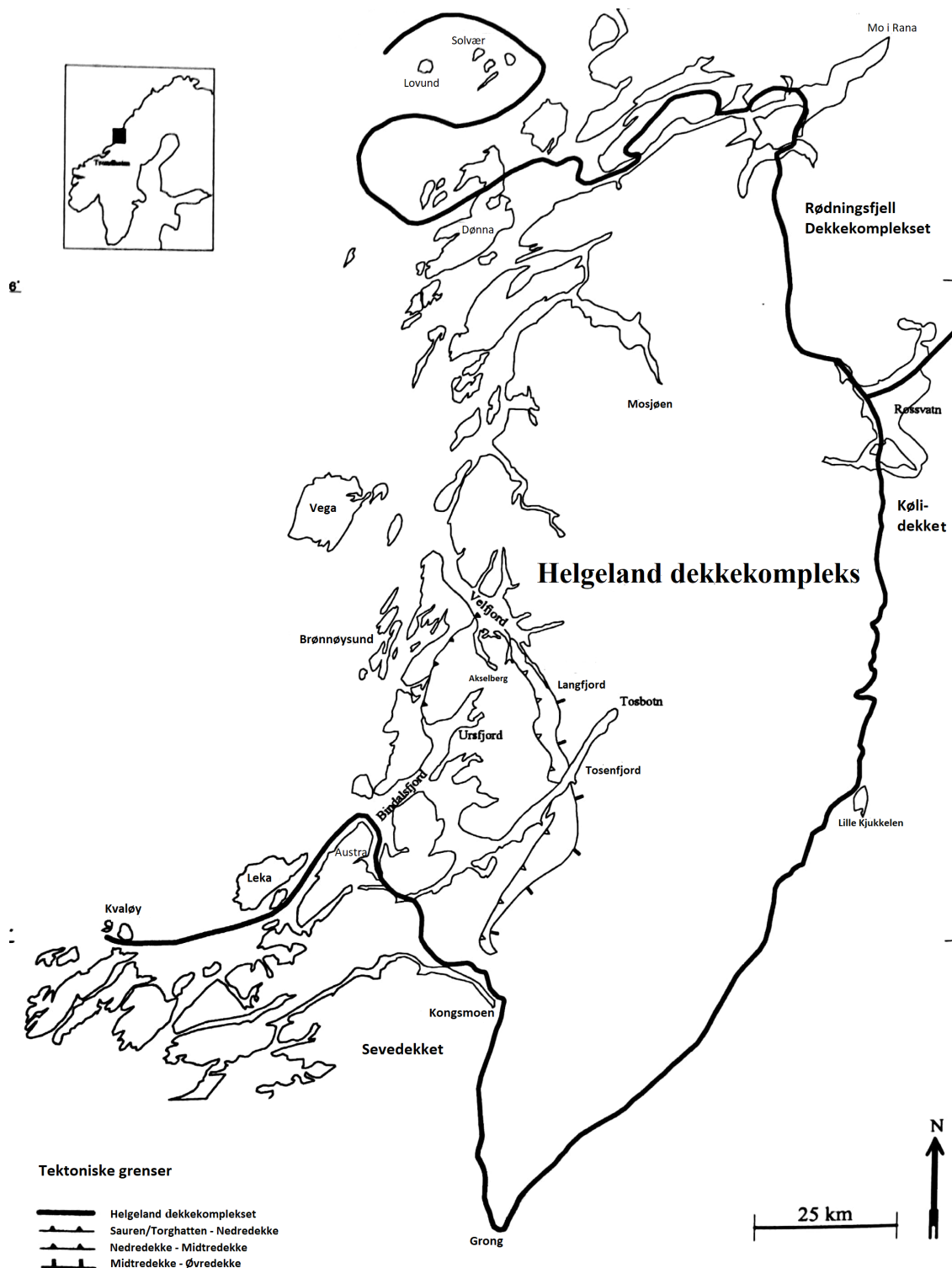
### B.2.3 Øvre allokton

Skyvedekken i øvre allokton er meget forskjellige fra de underliggende alloktonene. Øvre allokton ble dannet i Iaputushavet (Roberts, 2003), der øybuesystemene og havbunnskorpene har skrapet og stablet opp på de kontinentale dekkene etter kontinentkollisjonen (ofiolittene). Dette fant sted i Scandian-fasen (Andreassen, 1994). Bergartene her har stor variasjon i deformasjonsstil, omdanningsgrad og sammensetning, der en kan finne bergarter som marmor, mylonitter, grønnstein, glimmerskifer, gabbro, gneiser og ultramagiske bergarter (Ramberg mfl., 2006).

Øvre allokton kan deles inn i Seve- og Kølidedekken. Køli ligger strukturelt over Sevedekket. Kølidedekket består av vulkanssedimentære bergarter med metamorfosegrad ved grønnskiferfacies og ofiolittfragmenter. Disse bergartene stammer fra basseng- og øybuemiljøer (Robert og Gee, 1985) og (Sandøy, 2003). Sevedekket består av noe prekambriske bergarter, men hovedsakelig dominert av høygrads glimmerskifer, migmatitter, gneis, ekolgitter og amfibolitt.

## B.3 Regionalgeologi

### B.3.1 Helgeland dekkekomplekset



Figur B.1: Kart over Helgeland dekkekomplekset som strekker seg fra Mo i Rana i nord, Grong i sør, Vega og Røssvannet i vest og øst. Kartet viser en tilnærming av grensene til Helgeland dekkekomplekset. Kartet er hentet fra Sandøy, 2003 og modifisert i Adobe Illustrator.



Den nordlige-, og østlige grensen påvirkes av Nesnas-skjærsone (Eide mfl., 2002) og den sørvestlige grensen sammenfaller med Kollstraumen-skjærsone (Nordgulen mfl., 2002).

Den nordligste delen av Helgeland dekkekomplekset består av øyene Solvær og Lovunde. Disse øyene er omringet av Rødningsfjell dekkekomplekset og gneis fra Sjona grunnfjellsvinduet. Dette gjør at grensa fortsetter submarint sørover og følges på land igjen i Skibbåtsvær ved Dønna. I øst grenser den til Rødningsfjell dekkekomplekset. Ved Røssvannet tenkes det et trepunkts krysningspunkt mellom Helgeland dekkekomplekset, Rødningsfjell dekkekomplekset og Kølidedekket, der de to førstnevnte dekkene tilhører øverste allokton og den siste, øvre allokton. Den østlige til sørøstlige grensen strekker seg fra Røssvannet til Gartland i Grong, og er en reaktivert skyveforkastning (Gustavson, 1981) og (Sandøy, 2003). Langs den østlige grensen av Helgelands dekkekomplekset eksisterer det plutonske bergarter som Lille Kjukkulen. Lille Kjukkulen er omringet av Kølibergerter vest for Store Kjukkelvannet (Gustavson, 1988) referert i (Sandøy, 2003).

I sørvest fra Gartland hele veien til Kvaløy gjennom Kongsmoen og Austra, grenser den til Kollstraumen skjærsone, der skjærsone var aktiv både under kollisjonen under Scandian-fasen og ved devonsk ekstensjon. Den er 1-2 km tykk og faller mot nordøst (NØ), og deler flere dekkegrenser. Den har også bidratt til aktone gneiser er sidestilt med bergarter fra øverste allokton i dette området (Braathen mfl., 2000) og (Braathen mfl., 2001) referert i (Sandøy, 2003). I vest fra Gartland til noe nord for Kongsmoen grenser Helgeland dekkekomplekset til Sevedekket eller Skjøtingdekket som befinner seg i øvre allokton (Roberts, 1997). I denne regionen har bergartene et fall mot øst (Ø) og nordøst (NØ) med lav til middels vinkel (Nordgulen og Schouenborg, 1990).

### **B.3.2 Velfjordområdet**

#### **Midtredekket**

Midtredekket er skjøvet over nedredekket. Nederste delen av midtredekket består av ultramafiske og metagabbroiske bergarter, og er tolket som ofialittisk opphav. Ovenfor er det satt sammen av kalkstein og metamorfiserte bergarter som skifer og metakonglomerater (Thorsnes og Løseth, 1991).

Dekket kan bli fulgt fra Fuglestadsfjellet området i sør, der den ender til slutt ved granittiske plutoner fra Oksdal-massivet. Nordover fortsetter det over Tosenfjord til Neverneshalvøya, og videre

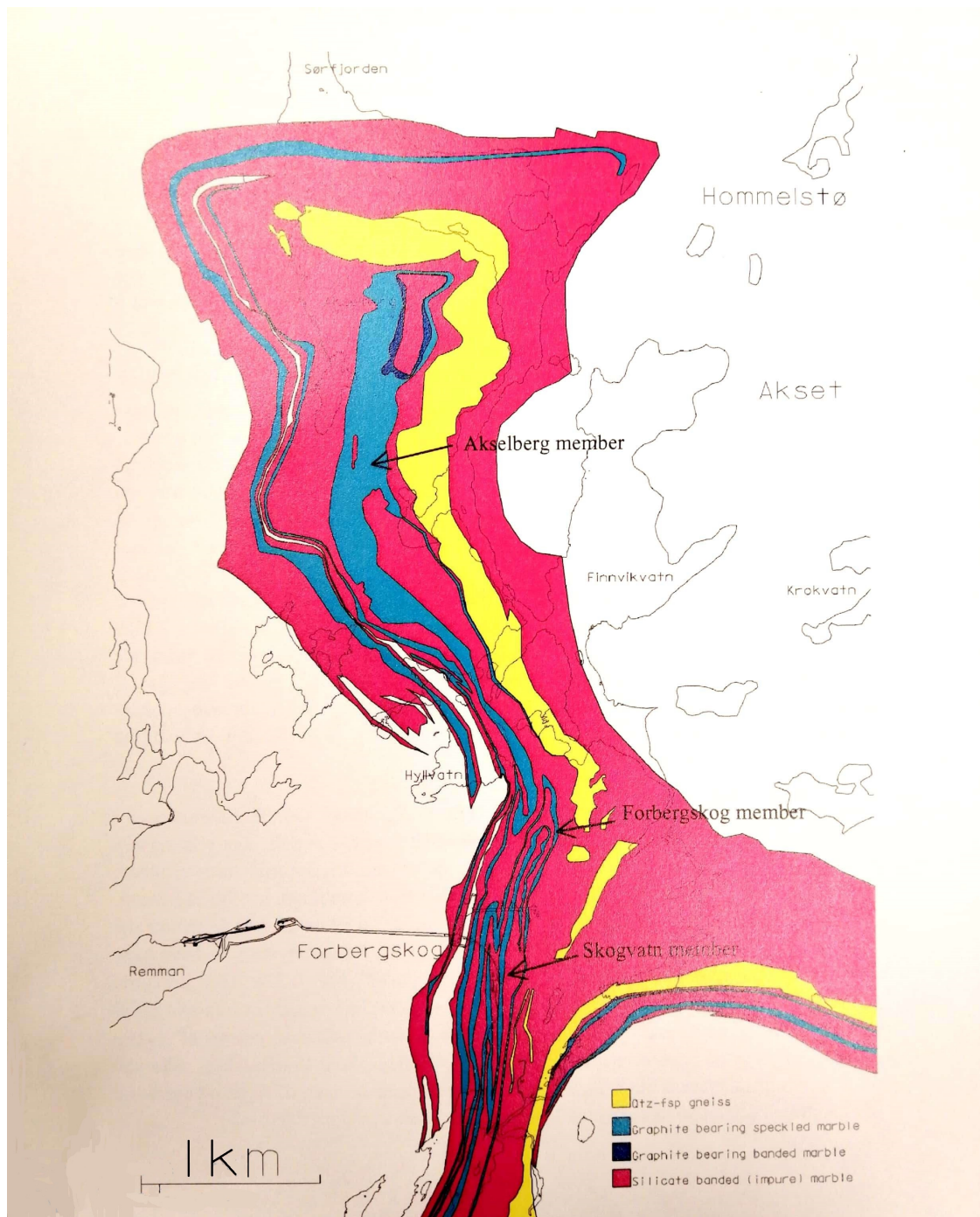
mot Andalshatten pluton (Sandøy, 2003).

### **Øvredekket**

Øvredekket består av den heterogene samlingen av delvis kalkrik migmatisk sandstein, skifer, kalkstein og kvarts-feltspatisk til mørk, biotitt og kalksilikatrike gneiser (Thorsnes og Løseth, 1991).

Det er store likhetstrekk mellom litologien av nedre- og øvredekket. Fra området rundt Fuglestadfjellet til Langfjorden, der den vestlige delen av øvredekket er avgrenset av skyveplanet med midtredekket. Dette gjelder ikke for et område noe sør for Tosenfjord, der magmatiske bergarter fra Oksdal-massiv delere dekket i to, nord og sør. Grensen i nord er ubestemt; den følger enten Langfjord til Storbørja eller deles av tonalittene fra Storfjord ved østsiden av Langfjorden. Fra langfjord fortsetter grensen inn mot Andalshatten pluton (Thorsnes og Løseth, 1991). I likhet med den nordlige grensen, er ikke den østlige grensen definert. Det bør nevnes at det er observert lignende bergarter fra øvredekket i nord, retningen mot Vefsfjord og øst mot grensen til Helgeland dekkekomplekset. Det er mulig at dette tilhører det øvre dekket eller en eller flere andre dekker som er deler av Helgeland dekkekomplekset eller andre dekker som ennå ikke er definert (Sandøy, 2003).

## B.3.3 Sauskarbonatene



Figur B.2: Et detaljert kart over nordlige Sauskarbonatene. Figuren er hentet fra Sandøy, 2003 og blitt modifisert i Illustrator.

## C Analyse av rådata

### C.1 Grovsortering av rådata



Figur C.1: Et 1:2 400 000 kart med oversikt over ulike anlegg utenfor nedredekket, men innenfor Helgeland dekkekomplekset (oransje-liste) og utenfor Helgeland dekkekomplekset (rød-liste). Kartet er laget i ArcGIS Pro.

Lokalitet	Navn	Fylke	Anlegg
1	Skjomen	Nordland	Vannkraft
2	Skorovatn	Trøndelag	Vannkraft
3	Joma	Trøndelag	Gruve
4	Fosdalen	Trøndelag	Gruve
5	Mo I Rana	Nordland	Gruve
6	Sulitjelma	Nordland	Gruve
7	Ørtfjellet	Nordland	Gruve
8	Sildvik	Nordland	Vannkraft
9	Sørfjord	Nordland	Vannkraft
10	Vestvågøy	Nordland	Fjellhall
11	Drag	Nordland	Gruve
12	Namsos	Trøndelag	Fjellhall
13	Kobbelv	Nordland	Vannkraft
14	Kobbskaret	Nordland	Veitunnel
15	Svartisen	Nordland	Veitunnel
16	Ormsetfoss	Trøndelag	Vannkraft
17	Kilvik	Nordland	Vannkraft
18	Stetind	Nordland	Veitunnel
19	Aunkammen	Trøndelag	Gasslager
20	Arnesfjellet	Nordland	Gruve
21	Nea	Trøndelag	Vannkraft
22	Storforshei	Nordland	Gruve
23	Hammerfall	Nordland	Gruve
24	Rana Gruber	Nordland	Gruve
25	Ballangen	Nordland	Gruve
26	Tosdalen Kraftverk	Nordland	Vannkraft
27	Tverråa Kraftverk	Nordland	Vannkraft
28	Hestvika	Trøndelag	Gruve

Tabell 21: Rød-liste representerer de anleggene som befinner seg utenfor Helgeland dekkekomplekset og er ikke av interesse for videre bergspenningsanalyse.

Lokalitet	Navn	Fylke	Anlegg
1	Bleikvassli	Nordland	Gruve
2	Leiråa Kraftverk	Nordland	Vannkraft
3	Bjørnstokk Kraftverk	Trøndelag	Vannkraft

Tabell 22: Oransje-liste representerer de anleggene som befinner seg innenfor Helgeland dekkekomplekset, men utenfor nedredekket. Disse anleggene er av lite interesse for videre bergspenningsanalyse.

## D Bergrom

### D.1 Empiriske beregninger

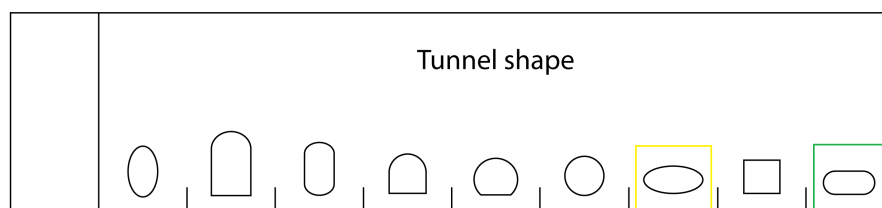
Det er gjort beregninger med ulike vertikalspenninger for å finne gode løsninger på utformingen av bergrommet. Disse er presentert i kommende delkapitler.

#### D.1.1 $\sigma_v = 5 \text{ MPa}$

##### Retning $\sigma_H$

$\sigma_{\theta_r}$	68,0	53,4	51,9	41,7	40,3	38,8	24,2	22,7	21,3
$\sigma_{\theta_w}$	-4,6	-7,1	-5,6	-3,1	-1,1	0,4	10,4	-5,1	4,9

Tabell 23: Empirisk metode - Utforming av bergrommet med  $\sigma_v = 5 \text{ MPa}$  ( $\sigma_H/\sigma_v$ ). Her er:  $\sigma_{\theta_r}$ : tangentielle spenninger i sideveggen og  $\sigma_{\theta_w}$ : tangentielle spenninger i taket. Enheten for spennin-gene er MPa (Mega Pascal) =  $10^6 \text{ Pa}$ . Beregningene er utført i Excel.



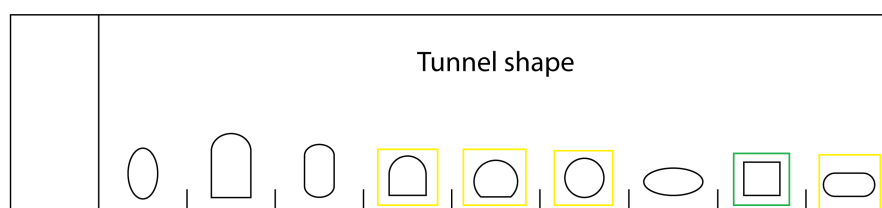
Figur D.1: En god utforming av bergrommet mtp spenning er markert med grønn firkant. Utformingene som er merket med gul firkant er også en mulig løsning, men ikke optimalt. Figurene er modifisert i Paint.



**Retning  $\sigma_h$** 

$\sigma_{\theta_r}$	43,0	33,4	32,4	25,7	24,7	23,8	14,2	13,2	12,3
$\sigma_{\theta_w}$	0,4	-2,1	-0,6	-1,9	3,9	5,4	15,4	-0,1	9,9

Tabell 24: Empirisk metode - Utforming av bergrommet med  $\sigma_v = 5$  MPa ( $\sigma_h/\sigma_v$ ). Her er:  $\sigma_{\theta_r}$ : tangentielle spenninger i sideveggen og  $\sigma_{\theta_w}$ : tangentielle spenninger i taket. Enheten for spenningene er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa. Beregningene er utført i Microsoft Excel.

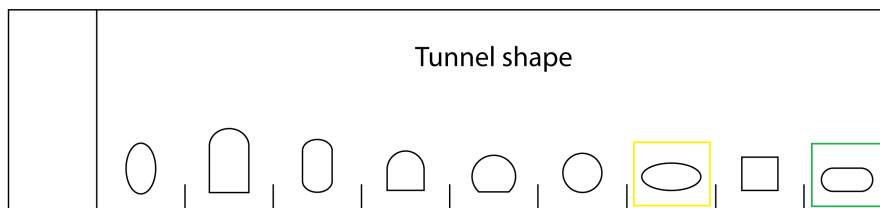


Figur D.2: En god utforming av bergrommet mtp spenning er markert med grønn firkant. Utformingene som er merket med gul firkant er også en mulig løsning, men ikke optimalt. Figurene er modifisert i Paint.

**D.1.2  $\sigma_v = 6$  MPa****Retning  $\sigma_H$** 

$\sigma_{\theta_r}$	67,0	52,4	50,9	40,7	39,3	37,8	23,2	21,7	20,3
$\sigma_{\theta_w}$	-2,6	-5,6	-3,8	-0,8	1,6	3,4	15,4	-3,2	8,8

Tabell 25: Empirisk metode - Utforming av bergrommet med  $\sigma_v = 6$  MPa ( $\sigma_H/\sigma_v$ ). Her er:  $\sigma_{\theta_r}$ : tangentielle spenninger i sideveggen og  $\sigma_{\theta_w}$ : tangentielle spenninger i taket. Enheten for spenningene er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa. Beregningene er utført i Microsoft Excel.

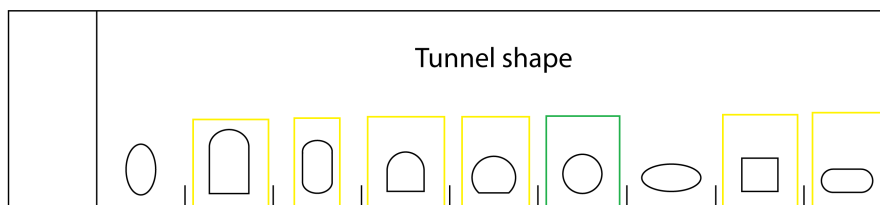


Figur D.3: En god utforming av bergrommet mtp spenning er markert med grønn firkant. Utformingene som er merket med gul firkant er også en mulig løsning, men ikke optimalt. Figurene er modifisert i Paint.

### Retning $\sigma_h$

$\sigma_{\theta r}$	42,0	32,4	31,4	24,7	23,7	22,8	13,2	12,2	11,3
$\sigma_{\theta w}$	2,4	-0,6	1,2	4,2	6,6	8,4	20,4	1,8	13,8

Tabell 26: Emperisk metode - Utforming av bergrommet med  $\sigma_v = 6 \text{ MPa}$  ( $\sigma_h/\sigma_v$ ). Her er:  $\sigma_{\theta r}$ : tangentielle spenninger i sideveggen og  $\sigma_{\theta w}$ : tangentielle spenninger i taket. Enheten for spenningene er MPa (Mega Pascal) =  $10^6 \text{ Pa}$ . Beregningene er utført i Microsoft Excel.



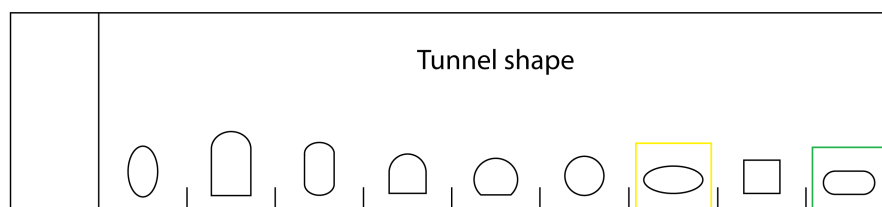
Figur D.4: En god utforming av bergrommet mtp spenning er markert med grønn firkant. Utformingene som er merket med gul firkant er også en mulig løsning, men ikke optimalt. Figurene er modifisert i Paint.



**D.1.3  $\sigma_v = 7$  MPa****Retning  $\sigma_H$** 

$\sigma_{\theta r}$	66,0	51,4	49,9	39,7	38,3	36,8	22,2	20,7	19,3
$\sigma_{\theta w}$	-0,6	-4,6	-2,0	1,5	4,3	6,4	20,4	-1,3	12,7

Tabell 27: Emperisk metode - Utforming av bergrommet med  $\sigma_v = 7$  MPa ( $\sigma_H/\sigma_v$ ). Her er:  $\sigma_{\theta r}$ : tangentielle spenninger i sideveggen og  $\sigma_{\theta w}$ : tangentielle spenninger i taket. Enheten for spenningene er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa. Beregningene er utført i Microsoft Excel.

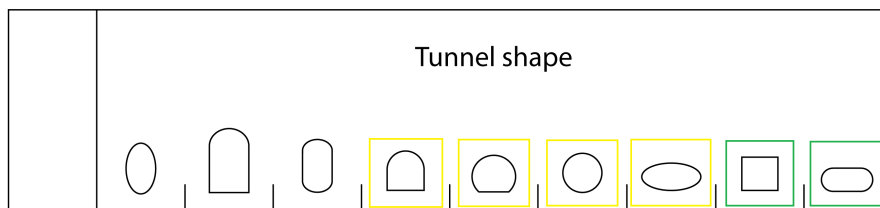


Figur D.5: En god utforming av bergrommet mtp spenning er markert med grønn firkant. Utformingene som er merket med gul firkant er også en mulig løsning, men ikke optimalt. Figurene er modifisert i Paint.

**Retning  $\sigma_h$** 

$\sigma_{\theta r}$	41,0	31,4	30,4	23,7	22,7	21,8	12,2	11,2	10,3
$\sigma_{\theta w}$	4,4	0,9	3,0	6,5	9,3	11,4	25,4	3,7	17,7

Tabell 28: Emperisk metode - Utforming av bergrommet med  $\sigma_v = 7$  MPa ( $\sigma_h/\sigma_v$ ). Her er:  $\sigma_{\theta r}$ : tangentielle spenninger i sideveggen og  $\sigma_{\theta w}$ : tangentielle spenninger i taket. Enheten for spenningene er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa. Beregningene er utført i Microsoft Excel.



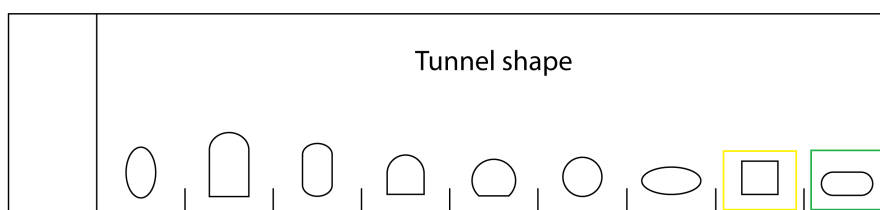
Figur D.6: En god utforming av bergrommet mtp spenning er markert med grønn firkant. Utformingene som er merket med gul firkant er også en mulig løsning, men ikke optimalt. Figurene er modifisert i Paint.

#### D.1.4 $\sigma_v = 9 \text{ MPa}$

##### Retning $\sigma_H$

$\sigma_{\theta_r}$	64,0	49,4	47,9	39,7	36,3	34,8	20,2	18,7	17,3
$\sigma_{\theta_w}$	3,4	-1,1	1,6	6,1	9,7	12,4	30,4	2,5	20,5

Tabell 29: Empirisk metode - Utforming av bergrommet med  $\sigma_v = 9 \text{ MPa}$  ( $\sigma_H/\sigma_v$ ). Her er:  $\sigma_{\theta_r}$ : tangentielle spenninger i sideveggen og  $\sigma_{\theta_w}$ : tangentielle spenninger i taket. Enheten for spenningene er MPa (Mega Pascal) =  $10^6 \text{ Pa}$ . Beregningene er utført i Microsoft Excel.

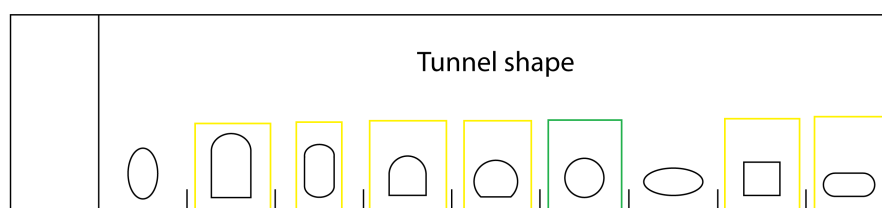


Figur D.7: En god utforming av bergrommet mtp spenning er markert med grønn firkant. Utformingene som er merket med gul firkant er også en mulig løsning, men ikke optimalt. Figurene er modifisert i Paint.

**Retning  $\sigma_h$** 

$\sigma_{\theta_r}$	39,0	29,4	28,4	21,7	20,7	19,8	10,2	9,2	8,3
$\sigma_{\theta_w}$	8,4	3,9	6,6	11,1	14,7	17,4	35,4	7,5	25,5

Tabell 30: Emperisk metode - Utforming av bergrommet med  $\sigma_v = 9 \text{ MPa}$  ( $\sigma_h/\sigma_v$ ). Her er:  $\sigma_{\theta_r}$ : tangentielle spenninger i sideveggen og  $\sigma_{\theta_w}$ : tangentielle spenninger i taket. Enheten for spenningene er MPa (Mega Pascal) =  $10^6 \text{ Pa}$ . Beregningene er utført i Microsoft Excel.

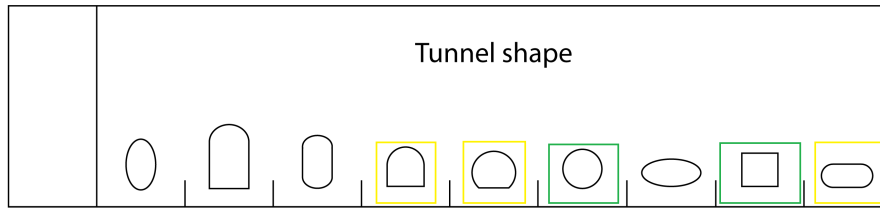


Figur D.8: En god utforming av bergrommet mtp spenning er markert med grønn firkant. Utformingene som er merket med gul firkant er også en mulig løsning, men ikke optimalt. Figurene er modifisert i Paint.

**D.1.5  $\sigma_v = 9,6 \text{ MPa}$** **Retning  $\sigma_H$** 

$\sigma_{\theta_r}$	63,4	48,8	47,3	37,1	35,7	34,2	19,6	18,1	16,7
$\sigma_{\theta_w}$	4,6	-0,2	2,7	7,5	11,3	14,2	33,4	3,6	22,8

Tabell 31: Emperisk metode - Utforming av bergrommet med  $\sigma_v = 9,6 \text{ MPa}$  ( $\sigma_H/\sigma_v$ ). Her er:  $\sigma_{\theta_r}$ : tangentielle spenninger i sideveggen og  $\sigma_{\theta_w}$ : tangentielle spenninger i taket. Enheten for spenningene er MPa (Mega Pascal) =  $10^6 \text{ Pa}$ . Beregningene er utført i Microsoft Excel.

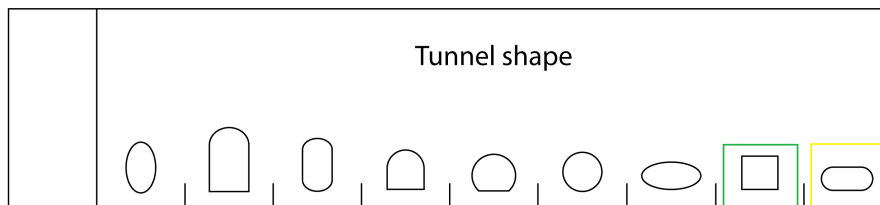


Figur D.9: En god utforming av bergrommet mtp spenning er markert med grønn firkant. Utformingene som er merket med gul firkant er også en mulig løsning, men ikke optimalt. Figurene er modifisert i Paint.

### Retning $\sigma_h$

$\sigma_{\theta_r}$	38,4	28,8	27,8	21,1	20,2	19,2	9,6	8,6	7,7
$\sigma_{\theta_w}$	9,6	4,8	7,7	12,5	16,3	19,2	38,4	8,6	27,8

Tabell 32: Emperisk metode - Utforming av bergrommet med  $\sigma_v = 9,6$  MPa ( $\sigma_h/\sigma_v$ ). Her er:  $\sigma_{\theta_r}$ : tangentielle spenninger i sideveggen og  $\sigma_{\theta_w}$ : tangentielle spenninger i taket. Enheten for spenningene er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa. Beregningene er utført i Microsoft Excel.

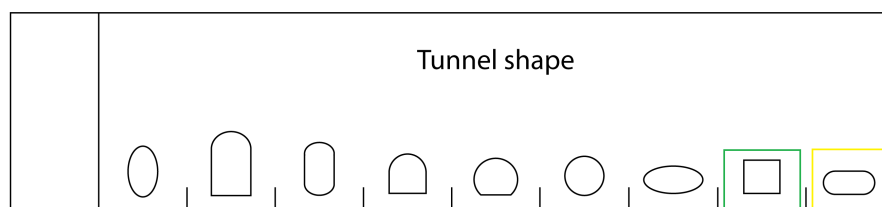


Figur D.10: En god utforming av bergrommet mtp spenning er markert med grønn firkant. Utformingene som er merket med gul firkant er også en mulig løsning, men ikke optimalt. Figurene er modifisert i Paint.

**D.1.6  $\sigma_v = 10$  MPa****Retning  $\sigma_H$** 

$\sigma_{\theta r}$	63,0	48,4	46,9	38,7	35,3	33,8	19,2	17,7	16,3
$\sigma_{\theta w}$	5,4	0,4	3,4	8,4	12,4	15,4	35,4	4,4	24,4

Tabell 33: Emperisk metode - Utforming av bergrommet med  $\sigma_v = 10$  MPa ( $\sigma_H/\sigma_v$ ). Her er:  $\sigma_{\theta r}$ : tangentielle spenninger i sideveggen og  $\sigma_{\theta w}$ : tangentielle spenninger i taket. Enheten for spennin-gene er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa. Beregningene er utført i Microsoft Excel.

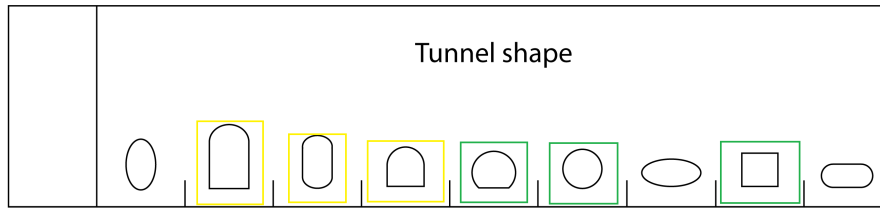


Figur D.11: En god utforming av bergrommet mtp spenning er markert med grønn firkant. Utformingene som er merket med gul firkant er også en mulig løsning, men ikke optimalt. Figurene er modifisert i Paint.

**Retning  $\sigma_h$** 

$\sigma_{\theta r}$	38,0	28,4	27,4	20,7	19,7	18,8	9,2	9,2	7,3
$\sigma_{\theta w}$	10,4	5,4	8,4	13,4	17,4	20,4	40,4	9,4	29,4

Tabell 34: Emperisk metode - Utforming av bergrommet med  $\sigma_v = 10$  MPa ( $\sigma_h/\sigma_v$ ). Her er:  $\sigma_{\theta r}$ : tangentielle spenninger i sideveggen og  $\sigma_{\theta w}$ : tangentielle spenninger i taket. Enheten for spennin-gene er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa. Beregningene er utført i Microsoft Excel.

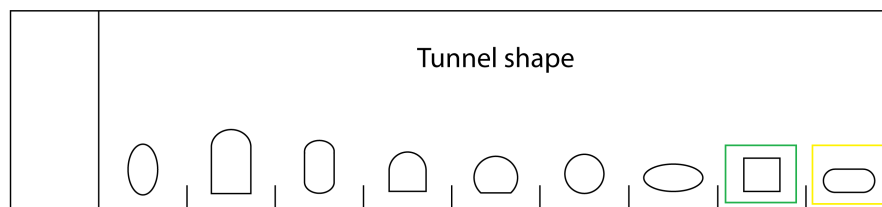


*Figur D.12: En god utforming av bergrommet mtp spenning er markert med grønn firkant. Utformingene som er merket med gul firkant er også en mulig løsning, men ikke optimalt. Figurene er modifisert i Paint.*

**D.1.7  $\sigma_v = 11,3$  MPa****Retning  $\sigma_H$** 

$\sigma_{\theta_r}$	61,7	47,1	45,6	35,4	34,0	32,5	17,9	16,4	15,0
$\sigma_{\theta_w}$	8,0	2,35	5,74	11,4	15,9	19,3	41,9	6,9	29,5

Tabell 35: Emperisk metode - Utforming av bergrommet med  $\sigma_v = 11,3$  MPa ( $\sigma_H/\sigma_v$ ). Her er:  $\sigma_{\theta_r}$ : tangentielle spenninger i sideveggen og  $\sigma_{\theta_w}$ : tangentielle spenninger i taket. Enheten for spenningene er MPa (Mega Pascal) =  $10^6$  Pa. Beregningene er utført i Microsoft Excel.

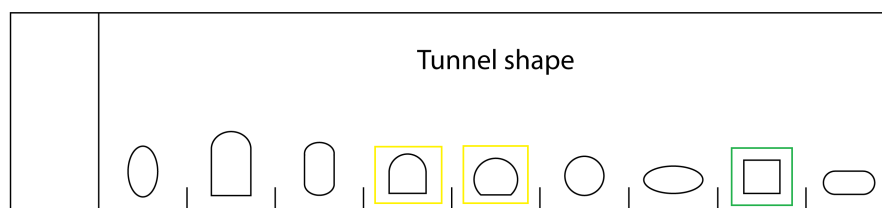


Figur D.13: En god utforming av bergrommet mtp spenning er markert med grønn firkant. Utformingene som er merket med gul firkant er også en mulig løsning, men ikke optimalt. Figurene er modifisert i Paint.

**Retning  $\sigma_h$** 

$\sigma_{\theta_r}$	36,7	27,1	26,1	19,4	18,5	17,5	7,9	6,9	6,0
$\sigma_{\theta_w}$	13,0	7,35	10,7	16,4	20,9	24,3	46,9	11,9	34,5

Tabell 36: Emperisk metode - Utforming av bergrommet med  $\sigma_v = 11,3 \text{ MPa}$  ( $\sigma_h/\sigma_v$ ). Her er:  $\sigma_{\theta_r}$ : tangentielle spenninger i sideveggen og  $\sigma_{\theta_w}$ : tangentielle spenninger i taket. Enheten for spenningene er MPa (Mega Pascal) =  $10^6 \text{ Pa}$ . Beregningene er utført i Microsoft Excel.



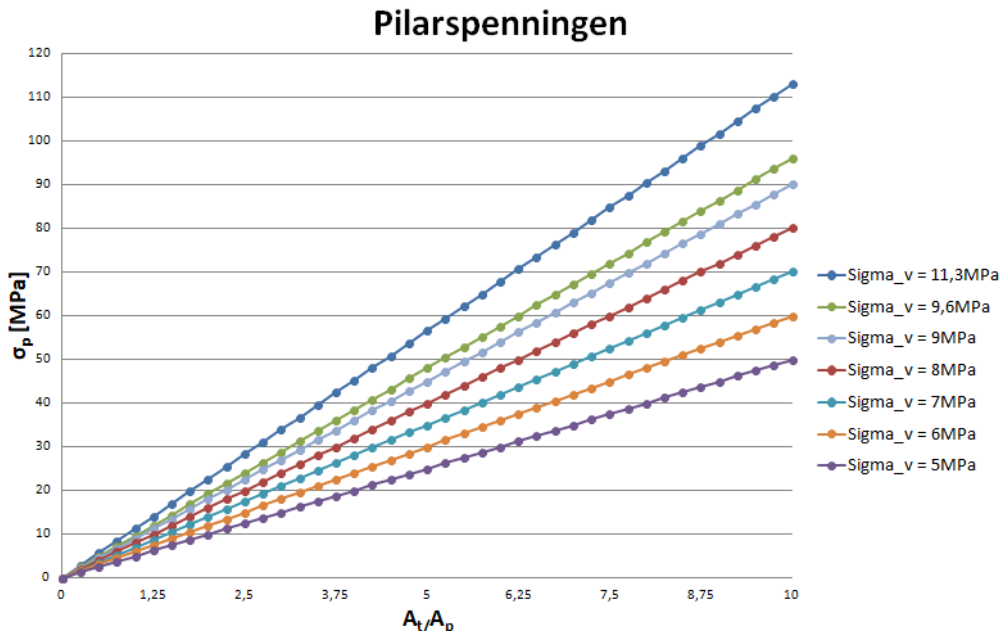
Figur D.14: En god utforming av bergrommet mtp spenning er markert med grønn firkant. Utformingene som er merket med gul firkant er også en mulig løsning, men ikke optimalt. Figurene er modifisert i Paint.



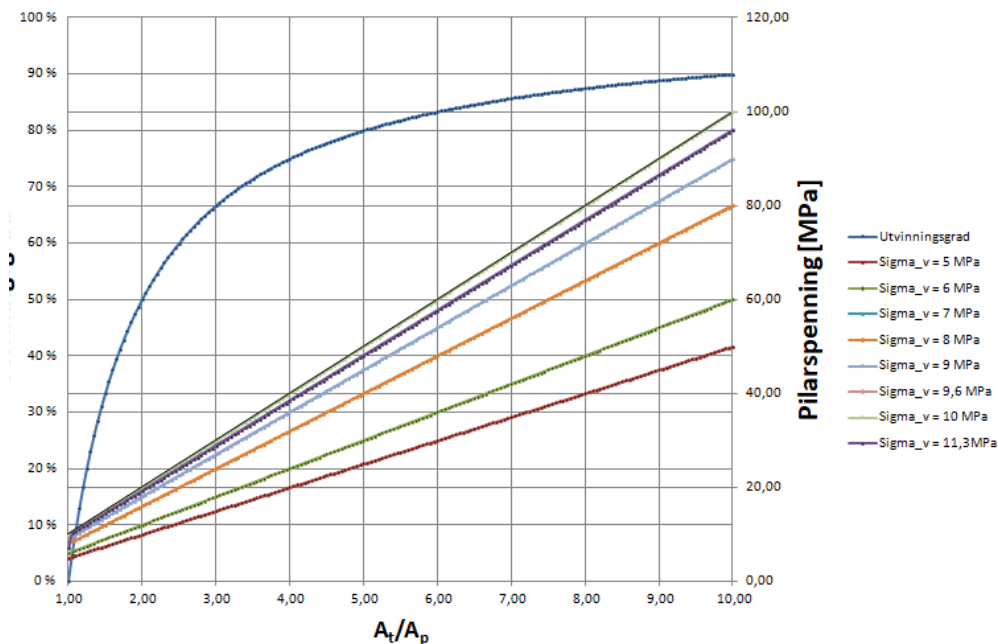
## D.2 Analytiske beregninger

### D.2.1 Pilarspenningen og utvinningsgrad

Grafisk fremvisning av analytiske beregninger av pilarspenningen basert på Formel (9) fra Avsnitt 2.4. Her er det gjort utregninger av forskjellige vertikalspenninger.



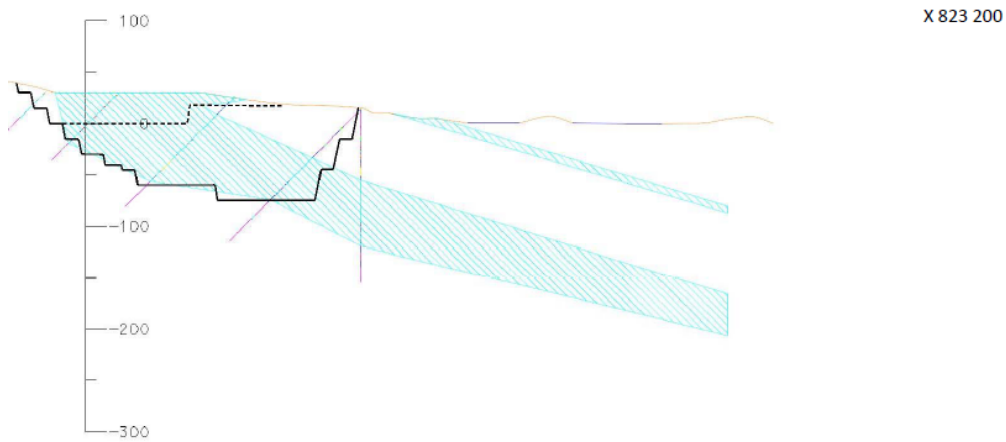
Figur D.15: Her er  $A_t/A_p$  forholdet mellom kryssjiktet til bergkolonnen  $A_t$  og kryssjiktet til pilaren,  $A_p$  og pilarspenningen,  $\sigma_p$ . Beregningene er utført i Microsoft Excel.



Figur D.16: Her er  $A_t/A_p$  forholdet mellom kryssjiktet til bergkolonnen  $A_t$  og kryssjiktet til pilaren,  $A_p$  og pilarspenningen,  $\sigma_p$  [MPa] langs y-aksen til høyre og utvinningsgraden  $R$  [%] langs y-aksen til høyre. Beregningene er utført i Microsoft Excel.

## D.3 Numerisk modellering

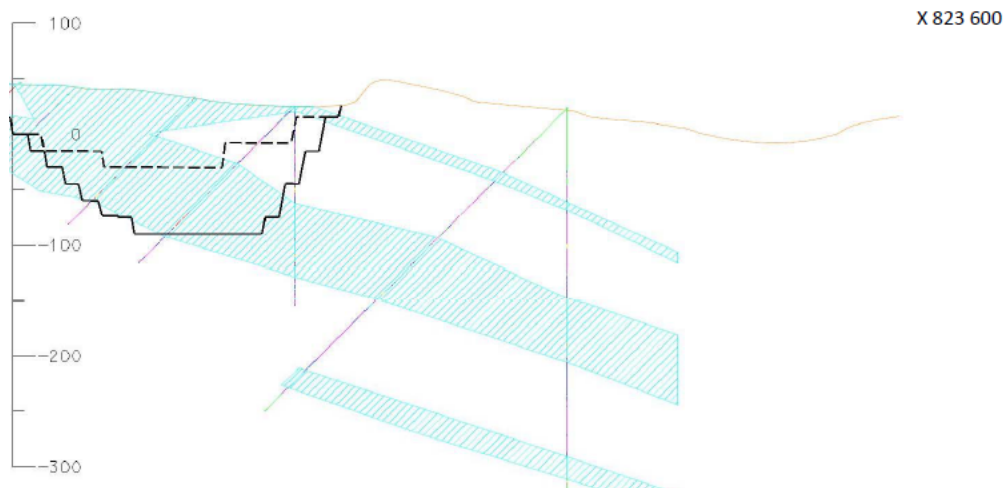
### D.3.1 Vertikalprofil



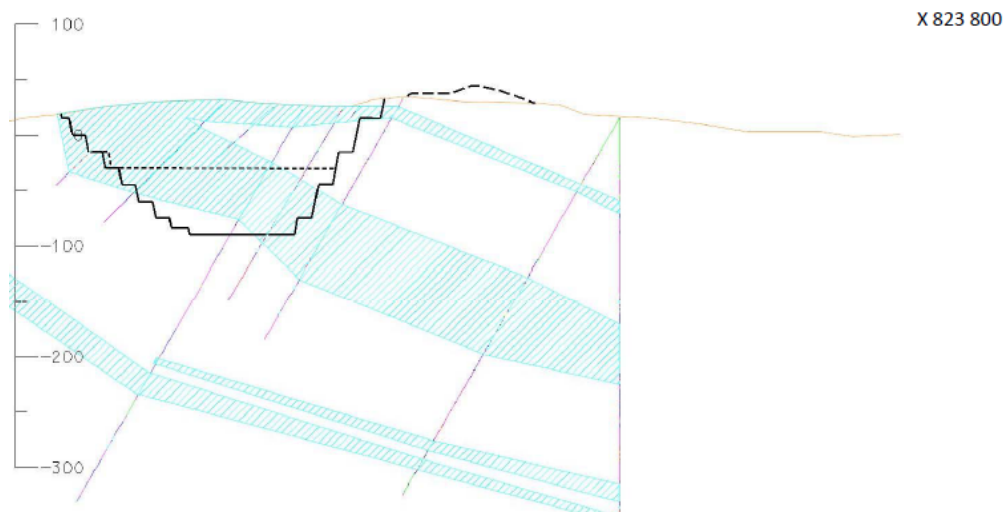
Figur D.17: Vertikalprofil: 823 200 av Akselberg. Kartet er laget av Brønnøy Kalk AS.



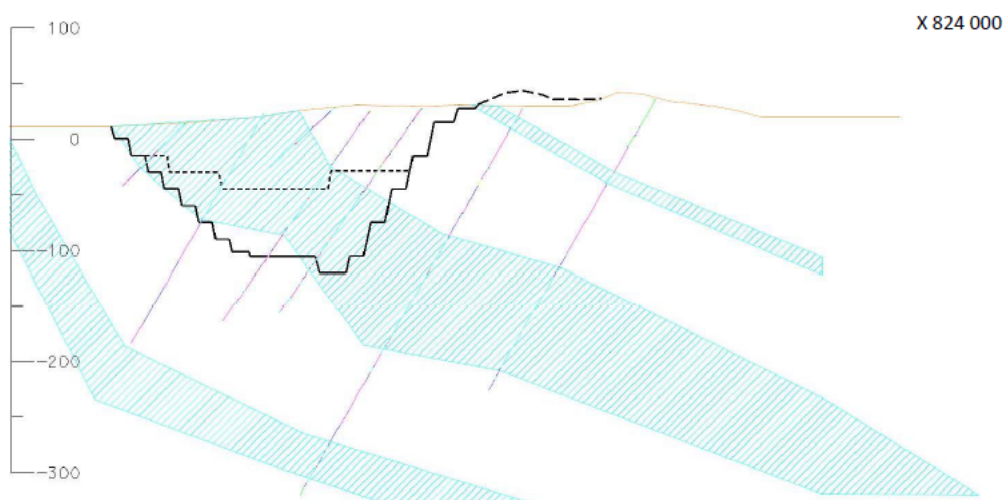
Figur D.18: Vertikalprofil: 823 400 av Akselberg. Kartet er laget av Brønnøy Kalk AS.



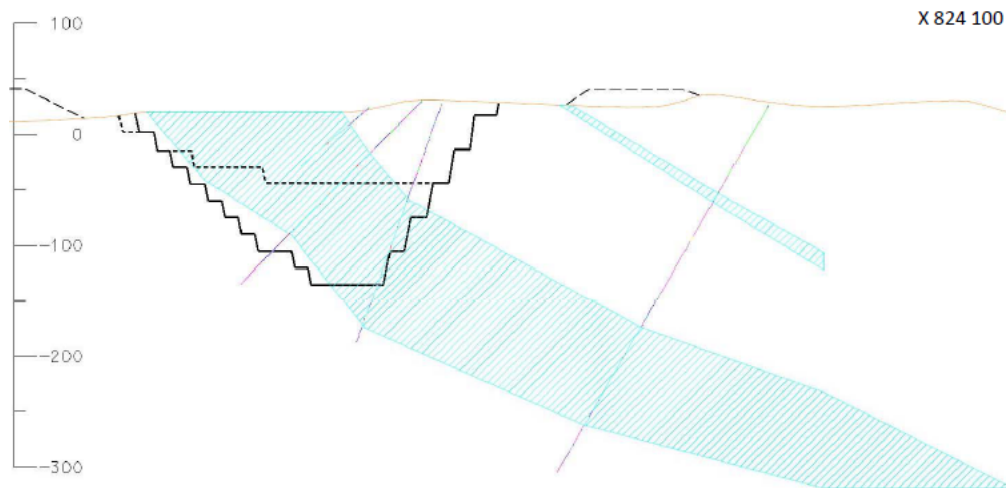
Figur D.19: Vertikalprofil: 823 600 av Akselberg. Kartet er laget av Brønnøy Kalk AS.



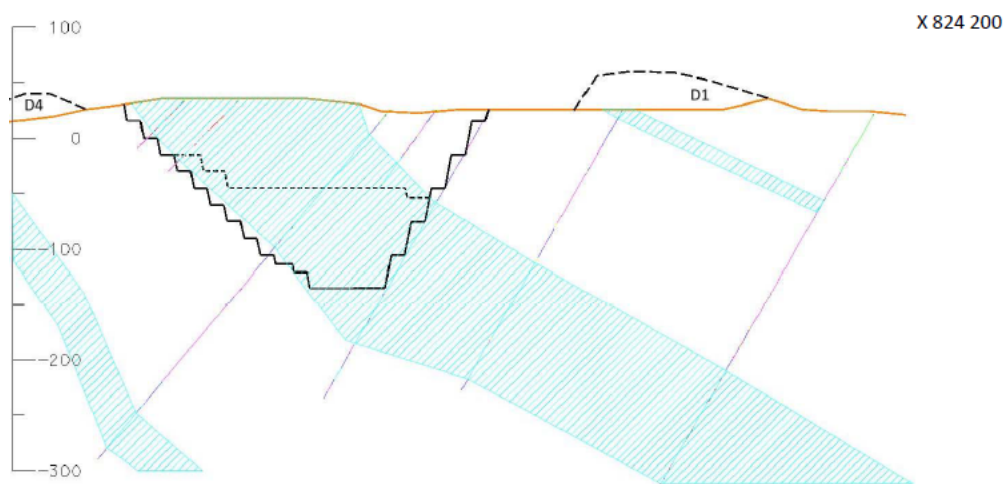
Figur D.20: Vertikalprofil: 823 800 av Akselberg. Kartet er laget av Brønnøy Kalk AS.



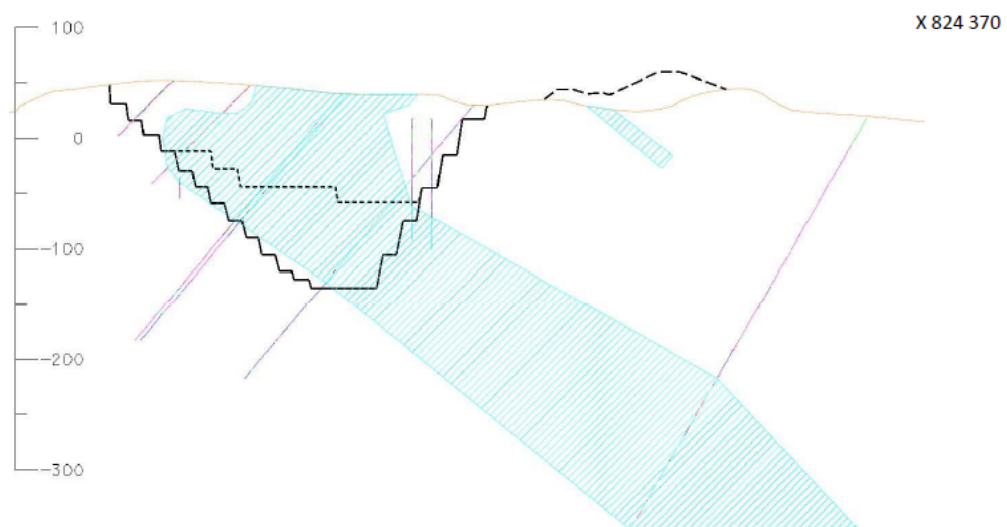
Figur D.21: Vertikalprofil: 824 000 av Akselberg. Kartet er laget av Brønnøy Kalk AS.



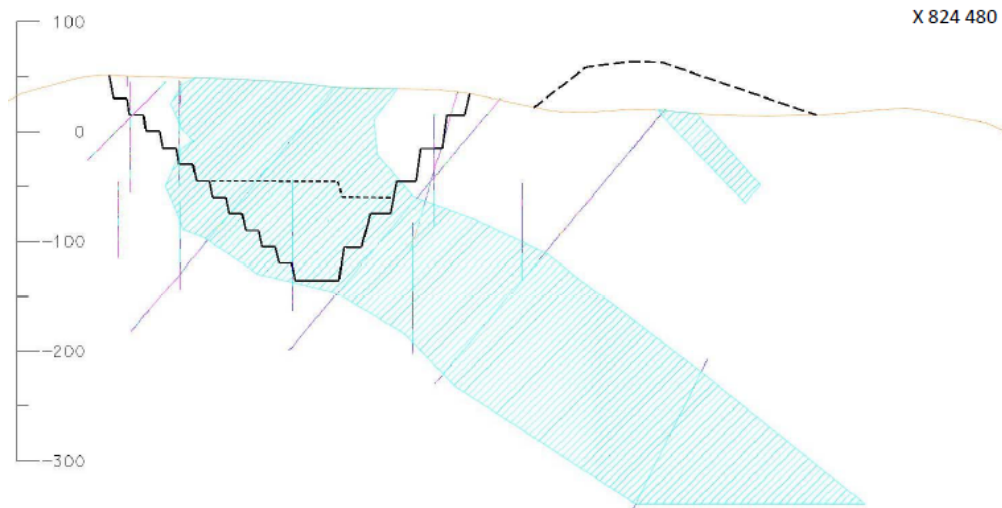
Figur D.22: Vertikalprofil: 824 100 av Akselberg. Kartet er laget av Brønnøy Kalk AS.



Figur D.23: Vertikalprofil: 824 200 av Akselberg. Kartet er laget av Brønnøy Kalk AS.

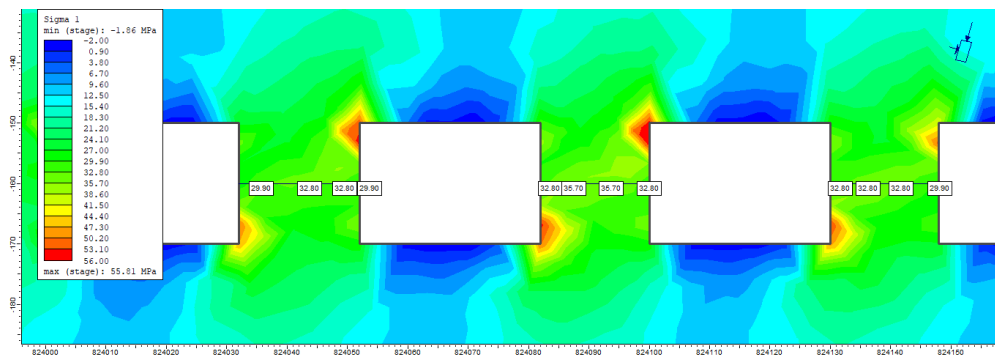


Figur D.24: Vertikalprofil: 824 370 av Akselberg. Kartet er laget av Brønnøy Kalk AS.

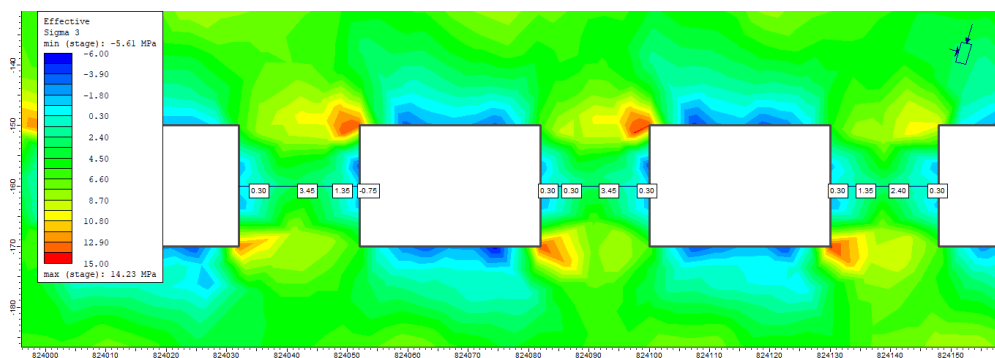


Figur D.25: Vertikalprofil: 824 480 av Akselberg. Kartet er laget av Brønnøy Kalk AS.

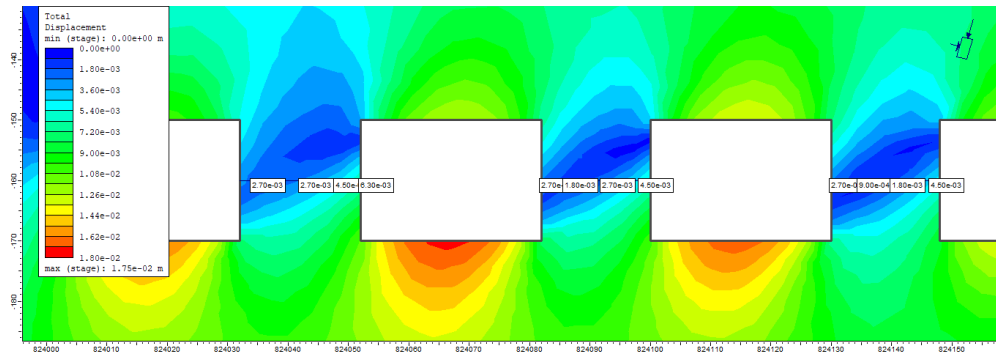
### D.3.2 Flere pilarer



Figur D.26:  $\sigma_1$ -analyse av effekten av flere pilarer



Figur D.27:  $\sigma_3$ -analyse av effekten av flere pilarer



Figur D.28: Deformasjonsanalyse av effekten av flere pilarer

