

Forslag til adkomstløsning for fremtidig brytning av forekomstene Rupsi, Giken og Charlotta i Sulitjelma

Med forslag til løsning for oppboring av Rupsi-forekomsten

Elisabeth Ramlo

Tekniske geofag

Innlevert: desember 2015

Hovedveileder: Steinar Løve Ellefmo, IGB

Medveileder: Charlie Li, IGB
Sunniva Haugen, IGB

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for geologi og bergteknikk



MASTEROPPGAVEN

<i>Kandidatens navn</i>	Elisabeth Ramlo
<i>Oppgavens tittel</i>	Forslag til adkomstløsning for fremtidig brytning av forekomstene Rupsi, Giken og Charlotta i Sulitjelma. Med forslag til løsning for oppboring av Rupsi-forekomsten.
<i>English title</i>	Proposed access to future mining operations in the Rupsi, Giken and Charlotta ore deposits in Sulitjelma. Including a suggestion for an exploration drilling campaign to investigate the Rupsi ore body

Utfyllende tekst:

1	Nye Sulitjelma Gruver er tildelt rettighetene til utvinning av malm i nærheten av de gamle gruvene i Nordgruvefeltet i Sulitjelma. Et mulig senario er produksjon av malm fra den hittil uberørte Rupsiforekomsten og fra posisjoner i forlengelsen mot dypet til de delvis utdrevne forekomstene Giken og Charlotta. Det er samtidig behov for diamantboring på Rupsiforekomsten og topografien i området gjør at dette må foregå fra borplasser etablert under jord. Oppgaven skal ta fram et forslag til adkomststoll inn til Rupsi som kan kombineres med opplegg for videre diamantboring på Rupsiforekomsten, samt en videre rampe ned til dypet av forekomstene Giken og Charlotta. Sentrale deler av arbeidet vil være: <ul style="list-style-type: none">• Vurdering av bergarter og svakhetssoner langs den valgte traséen og identifisering av eventuelle problematiske områder basert på tilgjengelig geologisk informasjon.• Numerisk analyse av typiske vertikalsnitt for å finne ut hvordan de utdrevne rommene påvirker stabiliteten til en fremtidig rampe, samt undersøke hvorvidt stabiliteten til den planlagte adkomststollen påvirkes av eksisterende klorittsone.• Valg av stigning og trasé som avveier drivekostnader og transportkostnader og som sikrer at adkomsten ligger i tilstrekkelig sikker avstand fra utdrevne områder med tanke på stabilitet.• Beregning av resulterende ortmeter og volumer for å kunne gi et grovt overslag over drivekostnader.
2	Opgaven er gjennomført i samarbeid med Nye Sullitjelma Gruver AS med Roar Hansen i Fauna som kontaktperson.
<i>Studieretning</i>	Mineralproduksjon og teknisk ressursgeologi
<i>Hovedprofil</i>	Mineralproduksjon
<i>Tidsrom</i>	10.08.2015 til 03.01.2016

Steinar L. Ellefmo

Steinar L. Ellefmo, førsteamanuensis og hovedveileder

Skjemaet tas inn som side 1 i masteroppgaven

NTNU, 16/12-15

Sammendrag

Nye Sulitjelma Gruver AS (NSG) planlegger ny drift i Nordgruvefeltet i Sulitjelma, nærmere bestemt på den hittil uberørte Rupsi-forekomsten, på bunnen av Nedre Charlotta gruve og på forlengelsen av Giken-forekomsten. Til dette kreves en adkomststoll og en nedadgående rampe. Parallelt med driving av adkomststollen er det også tiltenkt å gjennomføre undersøkelsesboring på Rupsi-forekomsten. De allerede utdrevne gruverommene vil kunne påvirke stabiliteten til en fremtidig rampe, og det er derfor viktig at denne plasseres i en tilstrekkelig sikker avstand fra disse. I tillegg er det blitt lokalisert en klorittsone i bunnen av Rupsi-stollen som kan være av stabilitetsmessig betydning for en fremtidig adkomststoll.

Det er på grunnlag av tilgjengelig geologisk informasjon fra området blitt gjort en vurdering av bergarter i området. En terrengeanalyse er blitt gjennomført i ArcGIS 10.2 for å identifisere svakhetssoner og andre strukturer som kan være av betydning for den planlagte traséen. Gruvekart og geologiske vertikallprofil fra det aktuelle området er blitt samlet inn og digitalisert for etablering av en forenklet 3D-modell av gruverommene og Rupsi-forekomsten i Leapfrog Geo. Tre profiler av det aktuelle området er blitt gjenstand for numerisk analyse i Examine2D for kalkulering av sikkerhetsfaktoren rundt gruverommene Nedre Charlotta og Giken og den planlagte adkomststollen. Som følge av usikkerheten til inngangsparameterne er det blitt foretatt parameterstudier av inngangsparameterne enaksial trykkfasthet, σ_{ci} , og GSI. I 3D-modellen i Leapfrog ble det, basert på resultatene fra den numeriske analysen og bestemmelse av stigningsgrad og horisontal krumningsradius, lagt inn to alternative forslag til adkomststoll, oppboring av Rupsi-forekomsten og videre rampe ned til bunnen av Nedre Charlotta og Giken. De to alternativene ble konstruert med ulike stigningsgrader, en med stigning 1:8 (12,5 %) og den andre med stigning 1:10 (10 %).

De geologiske vertikallprofil tyder på at forekomstene i Nordgruvefeltet fortsetter med samme fall hovedsakelig med kloritt i liggen og skifer i hengen. Fremtidig brytning på bunnen av Nedre Charlotta og forlengelsen av Giken-forekomsten kan dermed gi problemer med skviseberg. Terrengeanalysen viser generelt et bruddmønster med strøkretning ØNØ-VSV som kan medføre stabilitetsmessige problemer for en nedadgående rampe med tanke på dens ugunstige orientering i forhold bruddmønsteret. Numerisk analyse indikerer potensielle bruddsoner fra gruverommene Nedre Charlotta og Giken med maksimale utstrekninger opp mot henholdsvis 146 og 215 meter. Den numeriske analysen viser også at det vil forekomme

skjærbrudd i veggene til adkomststollen som følge av klorittsonen. Det anbefales å sikre med fiberarmert sprøytbetong og minimum 2,4 meter lange bolter i veggene. Fra skjematisk layout av de alternative forslagene i Leapfrog, kom det frem at alternativ 1 (stigning 1:8) fikk resulterende ortmeter på 6431 og resulterende boremeter på 1241. Alternativ 2 fikk resulterende ortmeter på 7804 og resulterende boremeter på 855.

En grov kostnadsberegning basert på drivekostnader og diamantkjerneboring, tilsier at alternativ 1 har best kostnadseffektivitet med en kostnad på ca. 226 millioner kroner sammenliknet med alternativ 2 sin kostnad på ca. 274 millioner kroner.

Abstract

Sulitjelma Mining AS (NSG) is planning to resume mining operations in the Nordgruvefield in Sulitjelma, more specifically on the not yet mined Rupsi ore body and on the extension of the Giken ore deposit. This requires development of an access adit, as well as a decline. Simultaneously, it is intended to carry out exploration diamond drilling on the Rupsi ore body. The already excavated mines could affect the stability of a future decline; hence it is of great importance that the decline is positioned at a sufficiently safe distance from these mine openings. Additionally, a chlorite zone has been located in the very end of the Rupsi adit, which could affect the stability of a future access adit.

Based on available geological information, an assessment of the geology in the area has been carried out. A terrain analysis has been conducted in ArcGIS 10.2 in order to identify weakness zones and other structures that may be of importance to the planned activities. Mine maps of the excavated mines in the Nordgruvefield together with geological cross sections have been collected and digitalized for the creation of a simplified 3D model of the mine openings and the Rupsi ore body in Leapfrog Geo. Three cross sections of the affected area have been subjected to numerical analysis in Examine 2D to calculate the strength factor around the lower Charlotta and the Giken mine openings, as well as the planned access adit. Due to the uncertainties associated with the input data, parameter studies of the uniaxial compressive strength σ_{ci} and the GSI have been carried out. Based on the results from the numerical analysis and determinations of ascending grade and horizontal curve radius, two alternatives were suggested for the layout design of the access adit, the exploratory drilling on the Rupsi ore body and the decline targeting the lower parts of the lower Charlotta and Giken mine openings in Leapfrog. The two alternatives were designed with different ascending grades, one with gradient of 1:8 (12,5 %) and the other one of 1:10 (10 %).

The geological cross sections indicate that the ore bodies in the Nordgruvefield continue with the same dip and with a footwall primarily consisting of chlorite and a hanging wall consisting of shales. Hence, future mining operations on the bottom of Nedre Charlotta and the extension of the Giken ore body may cause problems related to squeezing rocks. In general, the terrain analysis shows a fractured pattern with strike direction of ENE-WSW which could affect the stability of a future decline due to unfavorable orientation relative to the fractured pattern. The numerical analysis indicate potential fracture zones outwardly from

the lower Charlotta and Giken mine openings with maximum extents of 146 and 215 meters, respectively. As for the access adit, the numerical analysis show occurrence of shear failures in the tunnel walls. It is recommended to secure the walls with shotcrete as well as rock bolts with minimum length of 2,4 meters. From the layout made in Leapfrog, alternative 1 (gradient of 1:8) ended up with a total length of 6431 meters and 1241 meters of diamond core drilling. Alternative 2 however, ended up with a total length of 7804 meters and 855 meters of diamond core drilling.

A budget estimate based on tunneling costs and costs for diamond core drilling indicates that alternative 1 is the most cost effective alternative with a price of NOK 226 million compared to alternative 2 with a price of NOK 274 million.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Institutt for geologi og bergteknikk, ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) høsten 2015. Oppgaven fullfører et 5-årig masterprogram innen Mineralproduksjon og teknisk ressursgeologi.

Det er flere personer jeg ønsker å rette en takk til for deres støtte og bidrag til det som har vært et interessant og givende semester. Først og fremst vil jeg rette en stor takk til hovedveileder Steinar Ellefmo for god hjelp og støtte i arbeidet med denne masteroppgaven. Du har vært tilgjengelig for hjelp, gitt konstruktive tilbakemeldinger og vært en god diskusjonspartner.

Jeg vil også rette en stor takk til kontaktperson Roar Hansen fra Nye Sulitjelma Gruver AS for god tilgjengelighet og nyttige input, samt god mottakelse ved befaring i området. Videre vil jeg takke Kjell Sture Hugaas for deling av sin brede erfaring og kunnskap fra gruvedriften i Sulitjelma og som tok seg tid til å svare på spørsmål og sende ytterligere informasjon når dette var nødvendig. Til slutt vil jeg takke medveilederne Sunniva Haugen og Charlie Li for god deltakelse og hjelp til den numeriske analysen. Dere var også til stor hjelp ved ledsagelse under befaring.

Elisabeth Ramlo

NTNU, Trondheim

Desember 2015

Innholdsfortegnelse

1	INNLEDNING	1
1.1	OPPGAENS OPPBYGNING	3
1.2	BEGRENSNINGER VED OPPGAVEN	4
2	BAKGRUNN	6
2.1	NYE SULITJELMA GRUVER AS	6
2.2	SULITJELMAS HISTORIE	6
2.2.1	<i>Brytningsmetode</i>	6
2.3	GEOGRAFI OG GEOLOGISKE HOVEDTREKK	8
2.3.1	<i>Adkomststoll</i>	10
2.3.2	<i>Rampe Rupsi-Giken/Charlotta</i>	13
3	MATERIALE	15
3.1	DIGITAL TERRENGMODELL	15
3.2	KARTMATERIALE	15
3.3	SPENNINGSMÅLINGER	17
4	TEORI	19
4.1	BERGMASSEEGENSKAPER	19
4.1.1	<i>Bergarter</i>	19
4.1.2	<i>Svakhetssoner</i>	19
4.2	BERGMASSENS SPENNINGSTILSTAND	20
4.2.1	<i>In-situ spenninger</i>	20
4.2.2	<i>Spenningsanalyse</i>	22
4.2.3	<i>Orientering av bergrom</i>	24
4.3	ÅPNINGSARBEIDER	26
4.3.1	<i>Stigningsgrad</i>	26
4.3.2	<i>Kurveradius</i>	27
4.3.3	<i>Stabilitetsproblemer og bergsikring</i>	28
4.3.4	<i>Kostnadsberegninger</i>	28
4.4	DIAMANTKJERNEBORING	29
4.4.1	<i>Plassering av borehull</i>	30
5	METODE	31
5.1	TERRENGANALYSE	31
5.2	3D-MODELLERING	32

5.3	NUMERISK ANALYSE	34
5.3.1	<i>Generelt</i>	34
5.3.2	<i>Bruddkriterier</i>	35
5.3.3	<i>Profiler</i>	35
5.3.4	<i>Inngangsparametere</i>	38
5.4	LAYOUT	43
6	RESULTATER	45
6.1	SVAKHETSSONER.....	45
6.2	3D-MODELL	46
6.3	NUMERISK ANALYSE	47
6.4	LAYOUT	51
6.4.1	<i>Adkomststoll</i>	51
6.4.2	<i>Undersøkelsesboring</i>	52
6.4.3	<i>Rampe</i>	54
6.5	KOSTNADSBEREGNINGER.....	58
7	DISKUSJON	59
7.1	GEOLOGI.....	59
7.2	TERRENGANALYSE	59
7.3	NUMERISK ANALYSE	60
7.4	3D-MODELLERING	61
7.5	LAYOUT	62
7.6	KOSTNADSBEREGNINGER.....	63
8	KONKLUSJON	65
9	VIDERE ARBEID	66
10	REFERANSER	67
11	VEDLEGG	70

Omslagsbilde: Oversiktsbilde over Nordgruvefeltet og Langvannet. Hentet fra Leapfrog.

Figurliste

Figur 1 Oversiktsbilde av Nordgruvefeltet i Sulitjelma i horisontalplanet.	2
Figur 2 Skisse av brytningsmetode i Sulitjelma.	7
Figur 3 Berggrunnskart over Sulitjelma.	8
Figur 4 Stratigrafisk Ø-V profil gjennom Nordgruvefeltet	9
Figur 5 Skjematisk, stratigrafisk oversikt over malmsonene	10
Figur 6 Inngangspartiet til Rupsi-stollen.	11
Figur 7 Oversiktsbilde med omtrentlig plassering til Rupsi-forekomsten	13
Figur 8 Plassering til beskrevne, geologiske profil i nedre Giken.	14
Figur 9 Skviseberg i Nedre Charlotta.	14
Figur 10 Målested for spenningsmålingene utført i nedre del av Giken gruve.	17
Figur 11 Retninger til horisontalspenninger i Norge	22
Figur 12 Spenningskonsentrasjoner rundt bergrom med ulike tverrsnitt.	23
Figur 13 Avstand mellom bergrom	24
Figur 14 Bergtrykksproblemer med varierende orientering av største hovedspenning, σ_1	25
Figur 15 Vertikalprofil med orientering av bergrom i forhold til svakhetssone.	25
Figur 16 Springskurve for lastebil.	27
Figur 17 Fordeling av kostnader knyttet til åpningsarbeider.	29
Figur 18 Akser i NGO-koordinatsystemet med tilsvarende soner i UTM-koordinatsystemet	33
Figur 19 Omtrentlig plassering til de analyserte tverrsnittene	36
Figur 20 Generelle standardinnstillinger brukt til den numeriske analysen.	37
Figur 21 Analytiske standardinnstillinger brukt til den numeriske analysen.	37
Figur 22 Skjema for estimering av enaksial trykkfasthet, σ_{ci} , for den numeriske analysen.	39
Figur 23 Klassifiseringsskjema for GSI brukt for den numeriske analysen	40
Figur 24 3D-modell av gruverommene i Nordgruvefeltet sett mot sør-øst.	46
Figur 25 3D-modell av Rupsi-forekomsten sett mot nord.	46
Figur 26 Alternative adkomststoller sett mot nordøst.	51
Figur 27 Forslag til undersøkelsesboring sett ovenfra.	52
Figur 28 Forslag til undersøkelsesboring sett ovenfra med innlagt malmflate.	53
Figur 29 Forslag til undersøkelsesboring for alternativ 1 og 2 sett mot nord.	53
Figur 30 Forslag til videre adkomst/rampe sett ovenfra.	54
Figur 31 Forslag til videre adkomst/rampe sett ovenfra med innlagte avstandsbuffer.	55
Figur 32 Plassering til vertikalsnitt for inspeksjon av rampeløsning.	56

Figur 33 Vertikalsnitt av rampen for alternativ 1, sett mot sørvest.....	56
Figur 34 Vertikalsnitt av rampen for alternativ 2, sett mot sørvest.....	57

Tabelliste

Tabell 1 Oversikt over kartmateriale.....	16
Tabell 2 Transformasjon av lokale koordinater til NGO-koordinater.....	33
Tabell 3 Dimensjoner for de numeriske modellene i Examine2D.....	36
Tabell 4 Bergartsparametere for analysene av profilene A-A' og B-B' i Examine2D.....	41
Tabell 5 Bergartsparametere for analysen av profil C-C' i Examine2D.....	42
Tabell 6 Inngangsparametere for beregning av maksimal teoretisk stigning.....	44
Tabell 7 Resultater fra analysen av sikkerhetsfaktoren i profil A.....	48
Tabell 8 Resultater fra analysen av sikkerhetsfaktoren i profil B.....	49
Tabell 9 Resultater fra analysen av sikkerhetsfaktoren i profil C.....	50
Tabell 10 Kostnadsberegninger for resulterende ortmeter og boremeter.....	58

Terminologi

DirMin	Direktoratet for Mineralforvaltning	
DTM	Digital terrengmodell	
NTNU	Norges Tekniske- Naturvitenskapelige Universitet	
NGU	Norges Geologiske Undersøkelse	
NSG	Nye Sulitjelma Gruver AS	
Ort	Gruvegang som ikke munner ut i dagen	
Stoll	Gruvegang med en åpning i dagen	
Tunnel	Gruvegang med to åpninger i dagen	
σ_1	Største hovedspenning	[Mpa]
σ_2	Mellomste hovedspenning	[Mpa]
σ_3	Minste hovedspenning	[Mpa]
σ_H	Største horisontalspenning	[Mpa]
σ_h	Minste horisontalspenning	[Mpa]
σ_v	Vertikalspenning	[Mpa]
σ_{ci}/σ_c	Enaksial trykkfasthet, intakt berg	[Mpa]
γ	Bergartstetthet	[MN/m ³]
E	Youngs modulus	GPa
ν	Poissons tall	
m_i	Materialkonstant	
D	Forstyrrelsesfaktor	

1 Innledning

Selskapet Nye Sulitjelma Gruver AS (NSG) har fått rettighetene til utvinning av malm, nærmere bestemt kobber- og sinkkonsentrater, i de gamle gruvene i Nordgruvefeltet i Sulitjelma, Fauske kommune. Selskapet har beregnet at det finnes 10-15 millioner tonn drivverdig malm igjen i gruvene i Sulitjelma, og som kan gi grunnlag for kommersiell drift i minst 50 år. Tiltaket vil kunne bidra til regional verdiskapning og lokal sysselsetning og utvikling (NSG, 2013).

Det finnes et stort antall malmlinser i området med relativt slakt fall. Mange av disse linsene er allerede utdrevet, men det kan stå igjen malm i pilarer og i ytterkanten av de utdrevne forekomstene. I tillegg er det blitt gjort funn av en ny malmforkomst, Rupsi, men her eksisterer det begrenset informasjon om malmforkomstens utstrekning. Et mulig scenario er produksjon av malm fra Rupsi-forkomsten og fra posisjoner i forlengelsen mot dypet av Giken/Charlotta.

Drift på Rupsi krever en adkomststoll for hjulgående transport, og her er det naturlig at malmtransporten går på bil ut til offentlig veg langs Langvannet til knusestasjon og oppredningsverk. Denne adkomsten kan drives videre fra den allerede eksisterende Rupsi-stollen på høyde ti meter over Langvannet, som tidligere fungerte som adkomststoll inn til Bursi gruve. I enden av Rupsi-stollen er det imidlertid blitt gjort en registrering av ustabile partier og ras som følge av en klorittsone.

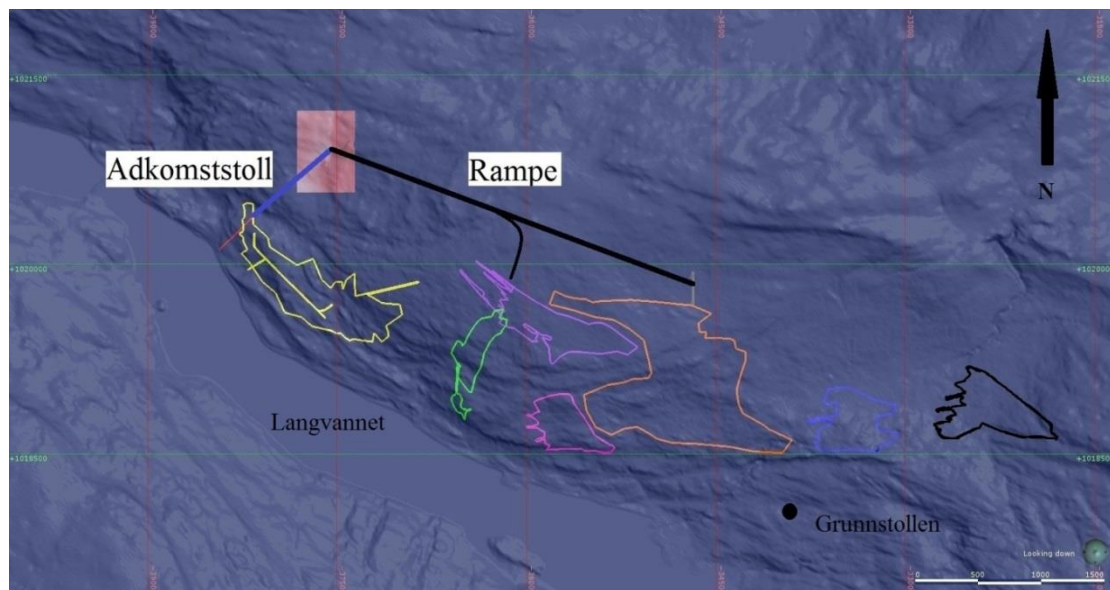
Det vil også være behov for geologiske undersøkelser og diamantboring på Rupsi-forkomsten, og topografien i området gjør at diamantboringen bør foregå fra en boreplattform etablert under jord. Derfor må adkomststollen planlegges på en slik måte at en oppnår optimal plassering for gjennomføring av diamantboringen.

Ny drift på dypet av Giken forutsetter at det etableres en adkomst i form av en rampe for hjulgående kjøretøyer, der også malmtransporten kan løses med lastebiler. Den horisontale og vertikale avstanden mellom Rupsi og tiltenkt endestopp i nedre Giken er på henholdsvis rundt 3000 meter og 700 meter. Rampen vil kunne havne i nærheten av flere utdrevne gruverom. En

forenklet skisse av adkomststoll og rampe er vist på Figur 1. Målet med oppgaven er, ved hjelp av et gitt tunnelverrsnitt, å foreslå den mest gunstige traséen for adkomststoll og rampe med tanke på klorittsonen, spenningsfordeling rundt eksisterende gruverom, drivekostnader og dimensjonerende faktorer som stigning og kurveradius. I tillegg vil det gis et forslag til opplegg for undersøkelsesboring på Rupsi-forekomsten.

Høydekoordinater/z-koordinater er i utgangspunktet oppgitt i forhold til Langvannets høyde (127,42 moh.). Dette av praktiske årsaker, da det meste av materialet som er innhentet bruker denne referansen. Under modelleringen og den numeriske analysen er standard måleenhet, moh., blitt brukt.

Det ble foretatt et besøk hos Nye Sulitjelma Gruver AS den 2. September 2015 for diskusjon av oppgave og påfølgende befarings i dagområdene rundt Nordgruvefeltet, samt i øvre deler av Giken gruve med adkomst fra grunnstollen. Notater fra befaringsen har vært nyttig for vurdering av ingeniørgeologiske utfordringer som kan påtreffes under driving av adkomst.



Figur 1 Oversiktsbilde av Nordgruvefeltet i Sulitjelma i horisontalplanet. Bildet viser en forenklet skisse av adkomststollen (blå strek) og rampen (svart strek). På bildet sees også konturene av gruverommene Ny Sulitjelma (svart), Hankabakken (blå), Giken (oransje), Charlotta Øvre (rosa), Charlotta Nedre (lilla), Mons Petter (grønn) og Bursi (gul), Rupsi-forekomsten (rødt), den eksisterende Rupsi-stollen (rød strek) og grunnstollen. Modifisert fra Leapfrog.

1.1 Oppgavens oppbygning

Disposisjonen til denne masteroppgaven er bygd opp på følgende måte:

- Bakgrunn
 - Bakgrunnsinformasjon om Nye Sulitjelma Gruver AS, historie om Sulitjelma og dens geografi.
 - Geologisk vurdering av aktuelt område.

- Teori
 - Generell teori om bergmasseegenskaper, bergmassens spenningstilstand, bruddkriteriet brukt i den numeriske analysen, aktuelle faktorer knyttet til driving av åpningsarbeider, kostnader og noe generell praksis for gjennomføring av diamantkjerneboring.

- Materiale
 - Presentasjon av det materiale som ligger til grunn for terrengeanalysen, 3D-modelleringen og den numeriske analysen: Digital terrengemodell (DTM), kartmateriale og spenningsmålinger.

- Metode
 - Generell informasjon om numerisk analyse og beskrivelse av prosedyrene gjort i programvarene ArcGIS 10.2, Microstation v8i, Leapfrog Geo og Examine2D.

- Resultater
 - Presentasjon av resultater og funn gjort fra foregående kapittel.

- Kostnadsberegninger
 - Prisanslag basert på resulterende ortmeter og volumer.

- Diskusjon
 - Diskusjon av resultater og funn, samt antakelser og begrensninger for oppgaven.

- Konklusjon
 - Foreløpig konklusjon vedrørende valg av trasé i henhold til resultatene gjort i oppgaven.

- Videre arbeid
 - Anbefalinger for videre arbeid.

- Vedlegg
 - Kartmateriale, koordinater for etableringen av 3D-modell, klassifiseringsgrunnlag for inngangsparametere i den numeriske analysen, resultater fra terrengeanalysen og tekniske data for kjøretøy.
 - Elektroniske vedlegg: CD med «Scene View» (krever Leapfrog Viewer)
 - Hele prosjektet kan mottas direkte fra undertegnede eller fra hovedveileder.

1.2 Begrensninger ved oppgaven

Hovedmålet med oppgaven er å presentere et forslag til trasè for adkomststoll og rampe og et alternativ til oppboring av Rupsi-forekomsten, med hovedfokus på stabilitetsmessig påvirkning fra utdrevne gruverom. Oppgaven tar imidlertid ikke hensyn til alle faktorer som er nødvendig for en fullstendig vurdering og planlegging av underjordiske åpningsarbeider. For det første er det ikke blitt gjort en vurdering av brytningsmetode. I tillegg er nødvendige installasjoner som ventilasjonssystem, strømforskyvning, knusestasjon, redningskamre, pumpestasjon, gasslagre osv. blitt neglisjert. Det vil ikke gjøres noen vurdering på vegdimensjonerende faktorer utover minste tillatte kurveradius og maksimal teoretisk stigning.

Det er ikke blitt gjort en vurdering av ingeniørgeologiske forhold som grunnvannsforhold og lokale bergmekaniske forhold som oppsprekking, lokale sprekkesoner osv. At Giken gruve i dag er fylt med vann opp til Grunnstollnivået, 56 meter over Langvannet vil også by på betydelige utfordringer knyttet til drivingen, men det er imidlertid ikke blitt lagt stor vekt på dette, og er derfor ansett som en betydelig begrensning ved oppgaven.

Gitt at det eksisterer få dokumenterte ingeniørgeologiske undersøkelser fra Sulitjelma, har det vært nødvendig med en rekke antakelser underveis. Blant annet har det ikke foreligget representative borekjerner fra området for laboratorietesting, og bestemmelse av inngangsparametere i den numeriske analysen har vært basert på tabulerte verdier og empiriske erfaringer. Dette regnes som en av de største begrensningene ved arbeidet med å optimalisere modellen, da forfatteren ikke var i stand til å kalibrere den numeriske modellen med reelle data for bergmassens styrkeegenskaper.

Programvaren brukt til den numeriske analysen, Examine2D, har begrensninger, blant annet er det kun mulig å gjennomføre analyser med elastisk materiale, og ikke plastisk. Derfor er det kun gjort en analyse av sikkerhetsfaktor, da elastisk materiale i teorien ikke kan gå i brudd. Selv om analysen av sikkerhetsfaktoren kan betraktes som plastisk, tar ikke analysen høyde for endret spenningsfelt og redusert bergartsstyrke etter brudd, og dette kan ha hatt en betydelig innvirkning på resultatene. I tillegg har den ikke innebygde funksjoner som gjør det mulig å installere bergsikring, jobbe med flere materialstyrker samtidig og simulere brudd.

2 Bakgrunn

2.1 Nye Sulitjelma Gruver AS

Nye Sulitjelma Gruver AS (NSG) har planer om å gjenoppta gruvedrift og produksjon av kobber- og sinkkonsentrater i de gamle gruvene i Nordgruvefeltet i Sulitjelma. NSG er et lokalt selskap der eiere av selskapet er deleiere eller ansatte i Fauskebygg. NSG har fått utvinningsrett til Nordgruvefeltet, og per dags dato er områdereguleringsplan med konsekvensanalyse sendt til Fauske kommune for kommunal behandling og godkjenning. Søknad om utslippstillatelse er under arbeid. Det er foreløpig vanskelig å anslå tidspunkt for oppstart, da behandling av søknad om utslippstillatelse kan ta tid, samt at endelig finansiering ikke er avklart.

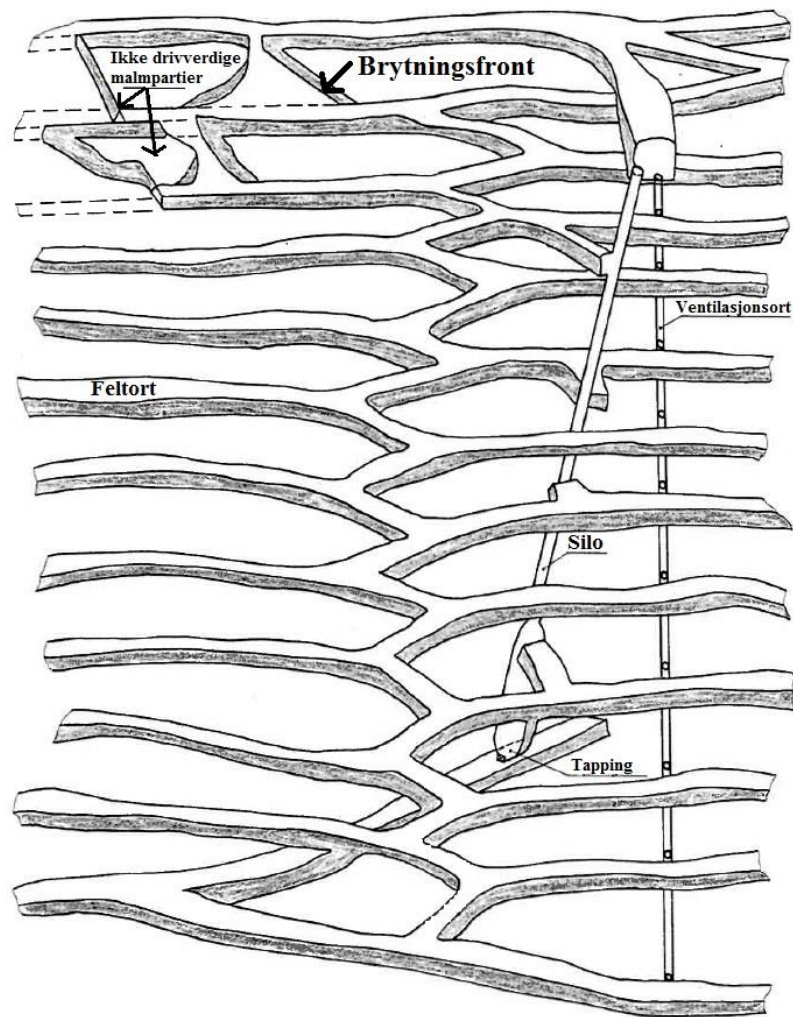
2.2 Sulitjelmas historie

Den første malmen ble oppdaget i Sulitjelma i 1858, men det ble ikke utført prøveboring før 1887 da industrigründeren Nils Persson fattet interesse for forekomsten og bidro med kapital. I 1891 ble Sulitjelma Aktiebolag etablert og utviklet seg etter hvert til å bli Norges nest største industriselskap, med totalt 1750 ansatte i 1913. Etter 50 års konsesjon kjøpte industriselskapet Elkem seg opp til over 90 % av aksjene og ble majoritetseier i 1965. I 1983 ønsket ikke lenger Elkem å fortsette gruvedriften, og bergverkskonsesjonen hjemfalt til staten, som opprettet Sulitjelma Bergverk AS. Grunnet lave kobberpriser og høye svovelutslipp, vedtok staten å legge ned bergverket i 1987, og siste skift gikk av i 1991, nøyaktig 100 år etter at selskapet Sulitjelma A/B ble stiftet. Fra år 1886 – 1991 ble det produsert 26 millioner tonn malm hvorav 460,000 tonn kobber og 215,000 tonn sink (NSG, 2015).

2.2.1 Brytningsmetode

I henhold til driftsplanen til NSG er det lagt opp til at all fremtidig gruvedrift vil skje under jord. Brytningsmetoden vil være tilpasset stedlige forhold, men vil i hovedsak baseres på brytning i rom med gjenstående malmpilarer. Det var brytningsmetoden «Ort og pilar» som ble benyttet i nedre Giken og Charlotta de siste tyve årene før gruvedriften ble nedlagt. Metoden gikk ut på malmpilarene ble delt opp i brytningsblokker med dimensjonene 500

meter i strøkretning og ca. 250 meter langs fallet. Midt i blokken ble det drevet en sikksakk-ort med stigning 1:7 med feltorter ut på hver side. Deretter ble det utført røving av mellomliggende pilarer, dvs. pilarene ble strosset ned til feltortens såle og lastet ut. Styrtsjaktene (siloene) og ventilasjonsortene ble fullprofilboret (Direktoratet for Mineralforvaltning, 1978). Brytningsmetoden er illustrert på Figur 2.

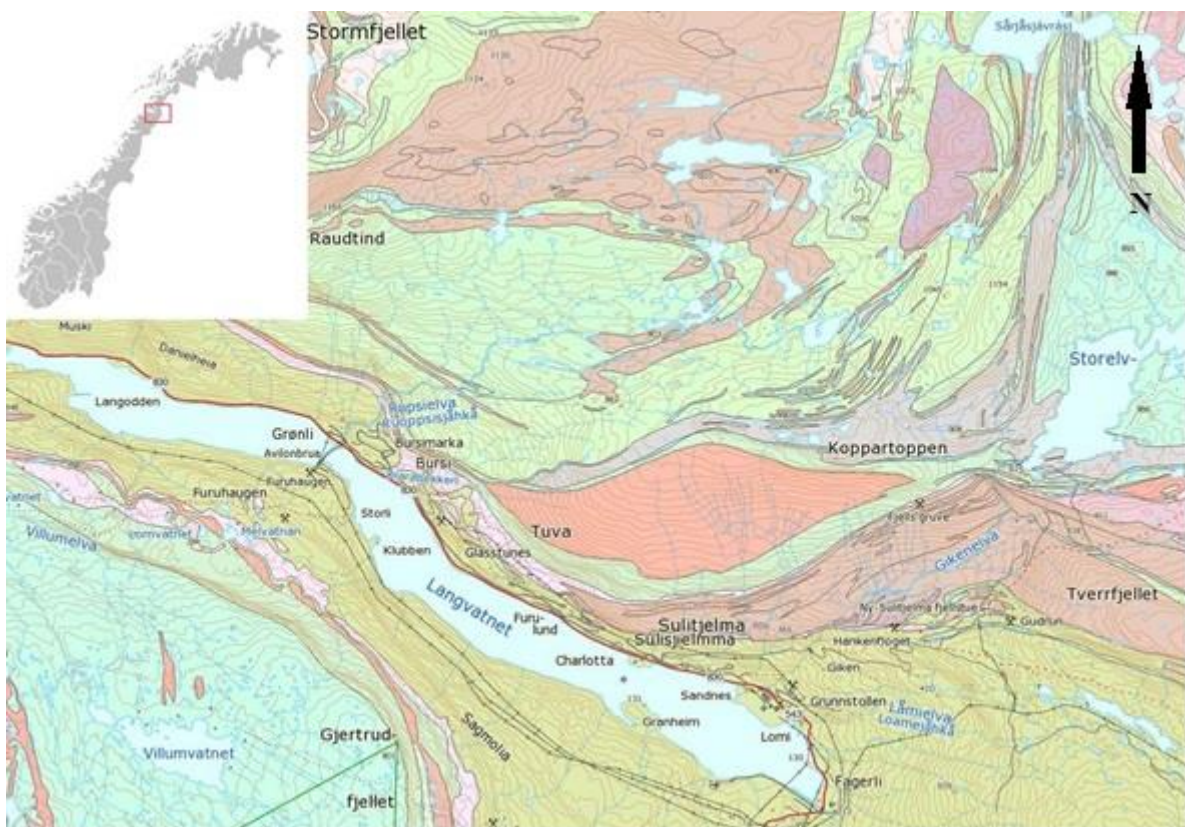


Figur 2 Skisse av brytningsmetode i Sulitjelma. Modifisert fra DirMin (1978).

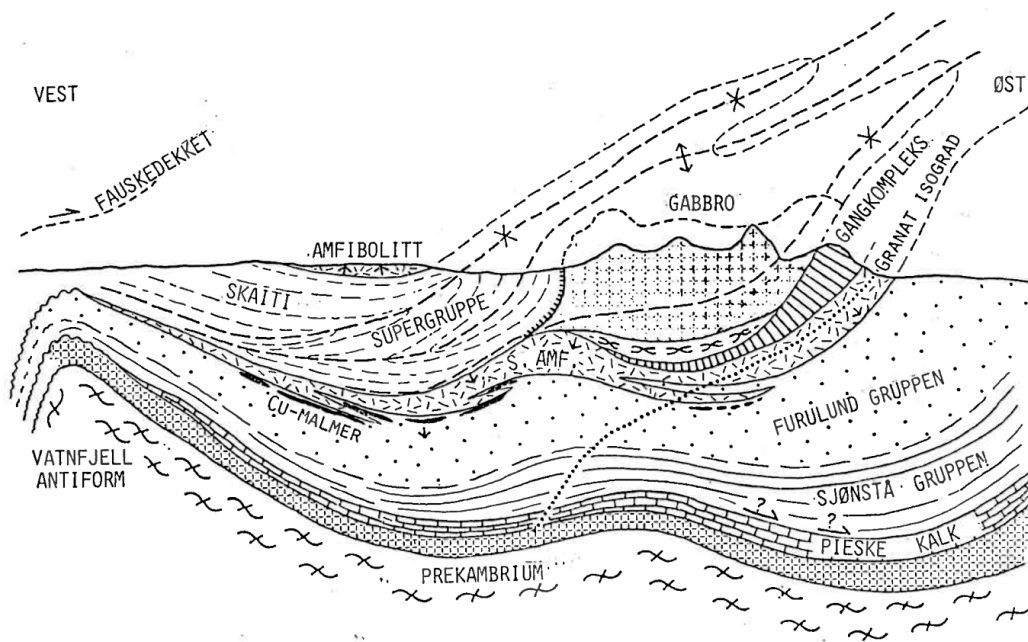
2.3 Geografi og geologiske hovedtrekk

Sulitjelma er et tettsted som er lokalisert i Fauske Kommune i Nordland, omtrent 39 km ØSØ for Fauske, se Figur 3. Tettstedet ligger på ca. 140 meter over havet på den nordlige bredde av Langvannet. Sulitjelma er en U-formet dal der Langvannet ligger på bunnen på ca. 127 moh. Områdene rundt er preget av svært varierende topografi, og høyeste punkt er Kobbertoppen på 1010 moh.

Områdene i og rundt Sulitjelma er hovedsakelig preget av skifre og brune glimmerskifre, amfibolitter og gabbro, se Figur 3. Et stratigrafisk Ø-V profil gjennom Nordgruvefeltet er vist i Figur 4 der bergartene regnet ovenfra og ned er Skaiti Supergruppe, Sulitjelma gabbrokompleks, Sulitjelma amfibolittgruppe, Furulundgruppen (skifer og grønnstein) og Sjønstågruppen (skifer og gneis). Området domineres av Skaiti Supergruppe, en omfattende skifergruppe delt opp i hele ti formasjoner (T. S. Hansen, 1983).



Figur 3 Berggrunnskart over Sulitjelma. Kartet viser «Lapphellaskifer» (grønn), glimmerskifer (gul), «Furulundgranitt» (mørkerosa), kvartsskifer (lilla) og amfibolitt (brun). Hentet fra NGU sin nasjonale berggrunnsdatabase.

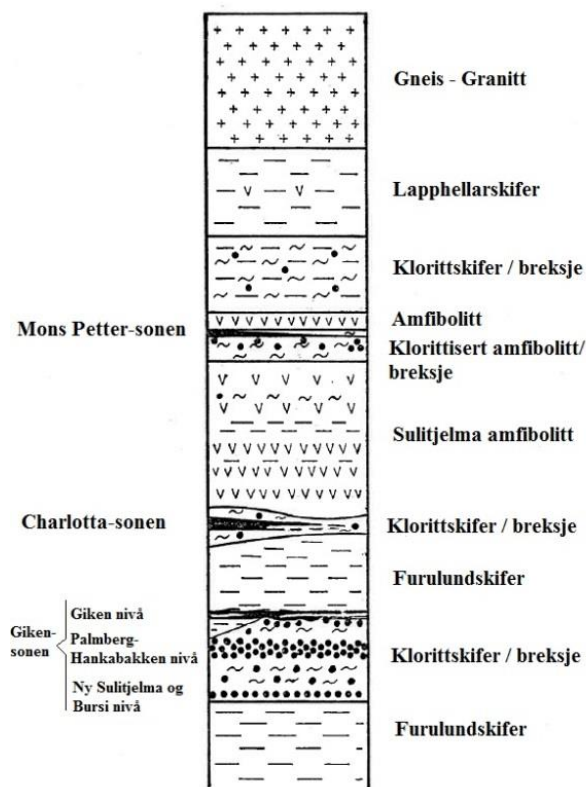


Figur 4 Stratigrafisk Ø-V profil gjennom Nordgruvefeltet (T. S. Hansen, 1983).

Malmforekomstene

I 1990 ble det registrert over 20 malmlinser i og rundt det sentrale Sulitjelma som til sammen utgjorde en ressurs på over 35 millioner tonn malm, som gjør området til en av Norges største sulfidmalmfelter. Sulfidforekomstene på Nordgruvefeltet ligger hovedsakelig langs eller nær grensen mellom underliggende amfibolitter eller overliggende skifre. Lagrekken er imidlertid snudd opp ned da de fleste sulfidkroppene ligger invertert grunnet stor-skala folding. En forenklet og samlet stratigrafisk oversikt over Nordgruvefeltet med stratigrafisk beliggenhet til Mons Petter-, Charlotta-, Giken-, Hankabakken-, Ny Sulitjelma- og Bursi-sonen er vist i Figur 5 og som for øvrig også viser nivåene til tre mineraliserte hovedsoner: Giken, Charlotta og Mons Petter.

Malmlinsene er tavleformede med lengder på 500-1200 meter, bredder på 200-400 meter og mektigheter på 1-15 meter. Lengdeakser har orientering NV-SØ (Cook, Halls, & Kaspersen, 1990). Disse faller mot N-NØ med et gjennomsnittlig fall på ca. 30 grader, noen steder brattere. Malmforekomstene blir med andre ord dypere jo lengre inn i fjellet fra Langvannet en beveger seg. Giken og Charlotta er de største av gruvene i Nordgruvefeltet som har vært i drift og det er her de største malmforekomstene ligger. De består av flere mindre gruver med felles adkomst fra Grunnstollen, som ligger 60 meter over Langvannet, se Figur 1.



Figur 5 Skjematisk, stratigrafisk oversikt over malmsonene (Hansen, 1983).

2.3.1 Adkomststoll

For adkomst inn til Rupsi-forekomsten, har man som hensikt å drive seg videre fra en allerede utdrevet adkomststoll inn til Bursi gruve, Rupsi-stollen. Rupsi-stollen har en relativt slak stigning 1:133 og er drevet 400 meter inn til Bursiforekomsten. For enveiskjøring med innlagte nisjer med eventuell lysregulering er adkomststoll og rampe tiltenkt å ha et tverrsnitt på 35 m², med bredde på 5 meter og en høyde på 7 meter. Dette vil også kunne ta høyde for krav til elektrisitet, vann og ventilasjon.

Befaring ved inngangen til Rupsi-stollen (omtrent 10 m over Langvannet), viste en tydelig horisontal foliasjon, og generelt blokkig berg med tre sprekkeretninger, se Figur 6. Bergarten i området var hovedsakelig glimmerskifer. Erfaringer gjort fra arbeid i Bursi gruve viser at det ofte var kloritt i hengen, og at spenningsmålinger utført i Bursi gruve viste strekkspenninger. Det kom også frem at Bursi gruve hadde flere ulykker med blokkfall av ellipsoideformede blokker, med 1-1,5 meter lengde og 60-70 cm tykkelse. En befaring i Rupsi-stollen og videre innover i Bursi gruve utført av NSG i november bekreftet tilstedeværelsen av denne

klorittsonen der det i enden av Rupsi-stollen og i deler av Bursi gruve ble gjort registreringer av ustabile partier og tilfeller av ras, som følge av denne sonen (Sture, 2015).



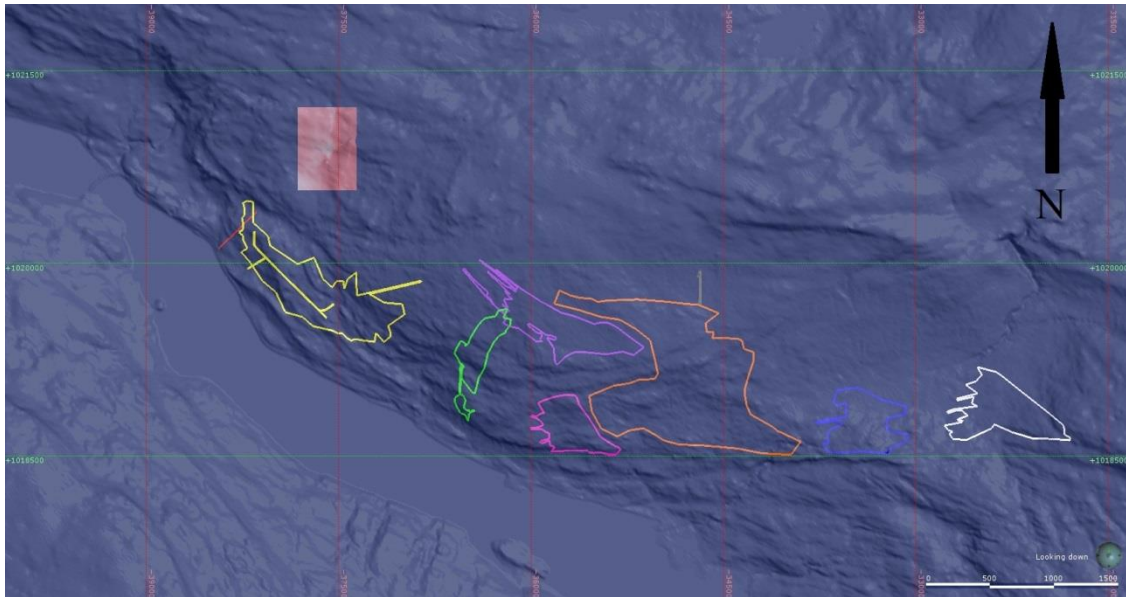
Figur 6 Inngangspartiet til Rupsi-stollen. Bildet viser tydelige blokkig berg med tre sprekkeretninger. Bilde tatt av undertegnede under befaring.

Rupsi-forekomsten

Rupsi-forekomsten er lokalisert helt vest i Nordgruvefeltet, og det har foreløpig ikke vært drevet gruvedrift på denne forekomsten. Det er begrenset med materiale som beskriver hvordan Rupsi-forekomsten ser ut, men har en omtrentlig plassering som vist på Figur 7. Tor Søyland Hansen (1983) konstruerte geologiske vertikalprofil over Nordgruvefeltet, der han tolket malmforekomstene litografisk og strukturelt, og profilet NØ-6 vist i Vedlegg 15 beskriver hvordan Rupsi-forekomsten befinner seg i lagpakken. Fra dette vertikalprofilet har Rupsi-forekomsten tilsynelatende samme fall som Giken og Nedre og Øvre Charlotta.

I tillegg til Tor Søyland Hansen sine stratigrafiske tolkning av Rupsi-forekomsten, fikk ASPRO Prospektering AS i 1985 i oppdrag av Sulitjelma Bergverk AS å foreta en systematisk gjennomgang av resultatene fra diamantboring gjort fra dagen. Totalt ble 14 hull og i underkant av 10,000 meter boret. Tre av de tolkede profilene fra diamantborehullene er blitt scannet: profil 3 (III), 4 (IV) og 5 (V), og disse ble valgt spesielt på grunn av deres nærhet til en fremtidig adkomststoll, da denne vil spille en sentral rolle i arbeidet med å oppnå en optimal plassering for videre diamantboring på Rupsi-forekomsten. Profil 3 og 4 er tilnærmet parallelle med en NNV-SSØ orientering, og krysser den planlagte adkomststollen. Profil 5 ligger tilnærmet parallelt med den planlagte adkomststollen på østre side med en NØ-SV orientering. Profilene vises i Vedlegg 16, Vedlegg 17 og Vedlegg 18 med deres respektive plassering vist i Vedlegg 5. Tolkede malmgrenser er markert med rødt på alle overnevnte vertikalprofil, og har som sådan vært grunnlag for modellering av forekomsten, beskrevet i kapittel 5.2.

Rapporten fra ASPRO konkluderer med at forekomsten er relativt begrenset i utstrekning mot øst og nordøst. Mot nord og vest er forekomstens utbredelse fortsatt noe ukjent, mens den mot sør begrenses av tidligere undersøkelsesboringer utført i forbindelse med gruvedriften i Bursi og Sigrid. Rapporten konkluderer også videre med at det er nødvendig med ytterligere undersøkelser av forekomsten i form av geofysikk og diamantboring (ASPRO Prospektering AS, 1986).



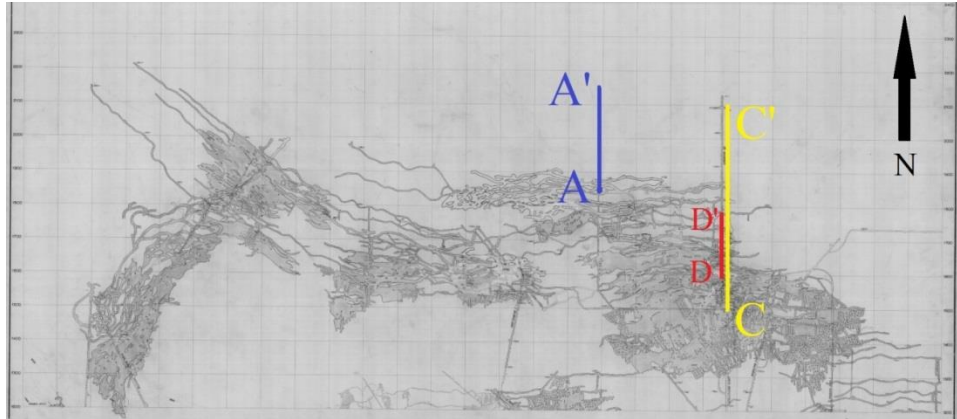
Figur 7 Oversiktsbilde med omtrentlig plassering til Rupsi-forekomsten angitt med rød firkant. Modifisert fra Leapfrog.

2.3.2 Rampe Rupsi-Giken/Charlotta

Videre fra Rupsi-forekomsten er det vurdert å etablere en rampe ned til bunnen av gruverommene Giken og Nedre Charlotta. I dette området eksisterer det flere gruverom, og mye av geologien kan tolkes fra geologiske vertikallprofil basert på utførte diamantborehull og fra skråsjakter. De geologiske vertikallprofilene er blitt hentet hos DirMin. For en geologisk tolkning av nedre del av Giken er tre av disse blitt benyttet for tolkning, og har plasseringer som anvist på Figur 8. De geologiske vertikallprofilene, som er tolket ut ifra diamantboring fra Giken (A-A'), nedre del av Kjell Lund sjakt (C-C') og skråsjakten Nordsynk (D-D') er lagt ved i henholdsvis Vedlegg 6, Vedlegg 8 og Vedlegg 9.

Profil A ble utarbeidet på grunnlag av utførte diamantboringer i 1972 fra nivå 396 til ca. 640 meter under Langvannet, med fall 26-38°. Profilet viser at råmalmen hovedsakelig ligger mellom glimmerskifer (gul) i hengen med partier av kloritt- og biotittbreksje (grønn) i liggen. Profil D ble tegnet i 1963, og viser en seksjon av skråsjakten Nordsynk III, samt to diamantborehull normalt på skråsjakten. Profilet går fra nivå 230 til ca. 350 meter under Langvannet. Også her ligger råmalmen (rød) mellom klorittskifer/breksje (grønn) og glimmerskifer (gul) med sporadiske partier med kvarts og amfibolitt. Det samme gjelder for profil C, som ble utarbeidet i 1969, og som viser den nedre delen av Kjell Lund sjakt, fra nivå

142 og ned til ca. 533 meter under Langvannet. Generelt viser de geologiske profilene fra Giken gruve en god overensstemmelse med Søyland Hansen sine stratigrafiske beskrivelser av malmsonene, der Giken-sonen ligger mellom Furulundskiferen og klorittbreksje.



Figur 8 Plassering til beskrevne, geologiske profil i nedre Giken. Modifisert fra DirMin.

Av problematiske forhold som er blitt rapportert, kan det nevnes at det i nedre Giken og Charlotta tidvis har vært utfordringer med skviseberg når det ble drevet ned til omtrent 200 meter under Langvannet. Dette er vist på Figur 9 som er fra en stigort i nede Charlotta på nivå 238 meter under Langvannet. Her ble horisontalspenningene så store at de overskred bergartsstyrken til klorittbreksjen i liggen, som resulterte i en heving av gulvet (Direktoratet for Mineralforvaltning, 1978).



Figur 9 Skviseberg i Nedre Charlotta. Bildet fra Kjell Sture Hugaas.

3 Materiale

3.1 Digital terrengmodell

For å kunne gjøre en terrengeanalyse i ArcGIS er det nødvendig med en digital terrengmodell (DTM). En DTM er hovedsakelig en visualisering av batymetrisk data, dvs. en samling av punkter med en registrert høyde. DTM'er egner seg for utarbeidelse av topografiske kart, geografiske analyser, 3D-visualisering osv. (Ramlo, 2014).

Terrengmodellen brukt i oppgaven er hentet fra Statens Kartverk med koordinatsystemet WGS 1984 UTM sone 33N. Terrengmodellen har en grid (oppløsning) på 10 x 10 meter og dekker et areal tilsvarende omtrent 72 km² og som er begrenset til et flateareal med hjørnepunkt gitt i følgende NGO-koordinater: (1024144, -40343), (1017036, -40559), (1016744, -31010) og (1023853, -30796).

3.2 Kartmateriale

En rekke kart og geologiske vertikallprofiler er blitt digitalisert og brukt som materiale i oppgaven. Det meste av kartmaterialet forelå i papirformat og er blitt scannet, mens noen var scannet fra før av. Større gruvekart (1080 x 640 mm) over allerede utdrevne gruverom i Nordgruvefeltet er blitt benyttet for 3D-modelleringen. Geologiske vertikallprofiler er hentet inn og lagt inn i modellen for å gi kunnskap om den generelle geologien i Nordgruvefeltet og Rupsi-forekomstens form og lokasjon. Vertikallprofilene kan i all hovedsak oppsummeres i følgende punkter:

- Geologiske tolkede profiler basert på diamantkjerneboring på Rupsi-forekomsten.
- Geologisk tolkede vertikallprofiler i retning N-S, basert på eksisterende sjakter og gjennomførte diamantkjerneboringer i nedre del av Giken gruve.
- Regionale, stratigrafiske vertikallprofiler i NØ-SV retning.

Alt kartmateriale som er brukt i oppgaven er listet opp i Tabell 1, og lagt ved som vedlegg. De geologiske vertikallprofilene er øremerket med bokstavene A-M og har sin plassering som anvist i Vedlegg 5.

Bokstav	Målestokk	Tittel	Publisert	Hentet fra	Vedlegg
Kart	(1:2500)	Bursi		DirMin	1
Kart	(1:2500)	Giken, Charlotta Nedre		DirMin	2
Kart	(1:2500)	Giken, Charlotta Øvre med Mons Petter		DirMin	3
Kart	(1:2500)	Ny Sulitjelma og Hankabakken		DirMin	4
A	(1:400)	Fargelagt Profil D.b.h Giken II	1972	DirMin	6
B	(1:800)	Profil av Kjell Lund Sjakt Øvre	1962	DirMin	7
C	(1:800)	Profil av Kjell Lund Sjakt Nedre	1969	DirMin	8
D	(1:200)	Nordsynk III	1963	DirMin	9
E	(1:800)	Profil av Robinssynk 1		DirMin	10
F	(1:2500)	NØ-2 Giken-Hankenholå	1979	T.S.Hansen	11
G	(1:2500)	NØ-3 Charlotta- Kobbertoppen	1979	T.S.Hansen	12
H	(1:2500)	NØ-4 Mons Petter- Kobbertoppen	1979	T.S.Hansen	13
I	(1:2500)	NØ-5 Glasstunes-Tuva	1979	T.S.Hansen	14
J	(1:2500)	NØ-6 Bursi-Rupsi	1979	T.S.Hansen	15
K	(1:2500)	Rupsi-feltet Profil III,	1986	NSG	16
L	(1:2500)	Rupsi-feltet Profil IV	1986	NSG	17
M	(1:2500)	Rupsi-feltet Profil V	1986	NSG	18

Tabell 1 Oversikt over kartmateriale.

3.3 Spenningsmålinger

Et begrenset antall spenningsmålinger eksisterer fra Nordgruvefeltet i Sulitjelma. Det ble imidlertid gjennomført spenningsmålinger ved forskningslaboratoriet ved NTH i årene 1980-83 i gravene Mons Petter, Sagmo og Giken. Likevel er det kun målingene registrert i Giken gruve som kan representere de eksisterende in-situ spenningene til bergmassen. Dette fordi borehullslengdene i Giken er de eneste som kan være tilstrekkelig lange nok til å havne i (antatt) upåvirket berg. Målingene ble på den tiden gjennomført med tanke på hvilken betydning spenningsbildet kunne ha for en fremtidig knuserstasjon i området.



Figur 10 Målested for spenningsmålingene utført i nedre del av Giken gruve.

Det ble utført i alt åtte målinger med borelengder fra 4,1 til 7,5 meter. Målingene i Giken ble utført med tredimensjonalt utstyr, og målestedets lokalitet er anvist på Figur 10, som var gravens daværende dypeste punkt. Målestedet ligger omtrent 300 meter under Langvannet med en overdekning på ca. 900 meter. Bergarten i området er skifer. Følgende spenningsmålinger ble beregnet (A. Myrvang, 1983).

- σ^1 : 24,6 MPa med 63° fall mot nord
- σ^2 : 9,6 MPa med 2° fall mot vest (tilnærmet horisontal)
- σ^3 : 8,5 MPa med fall 27° mot sør
- σ^v (målt): 21,2 MPa

Myrvang (1983) konkluderte med at spenningsbildet så ut til å «normalisere» seg ved at største hovedspenning viser tendenser til å falle i samme retning som fallet til lagdelingen. Videre ble det anbefalt å utføre spenningsoptiske modellforsøk for å få et riktigere bilde av spenningene i området. Disse spenningsmålingene ble imidlertid brukt som inngangsparametere til den numeriske analysen i Examine2D som beskrives nærmere i kapittel 5.3.

4 Teori

4.1 Bergmasseegenskaper

4.1.1 Bergarter

Ifølge Nilsen og Broch (2010) kan bergarter defineres som et naturlig aggregat av ett eller flere mineraler. Bergarter som materiale varierer med type, mengde, størrelse, form og orientering av mineralkornene, samt sammenbindingen av disse. Det er en stor spredning innen fysikalske og mekaniske egenskaper, ikke bare mellom de ulike bergartene men også mellom bergarter innen de ulike bergartsgruppene. Ved bestemmelse av bergarters mekaniske egenskaper blir det normalt brukt enaksial trykktesting, også kalt UCS-test (Uniaxial Compressive Strength).

4.1.2 Svakhetssoner

Svakhetssoner i berggrunnen er lineære fordypninger i terrenget forårsaket av høy bruddfrekvens. Svakhetssoner opptrer hovedsakelig i form av sprekker, knusningssoner og forkastninger. Svakhetssoner kan identifiseres ved å studere eksisterende topografiske og geologiske data, samt ved befarings ved at de kan tolkes som markante dalsøkk/forsenkninger fra omliggende terreng. En bør forsøke å legge spesielt merke til kritiske soner som kan være av betydning for bergrom lenger ned i bergmassen. Skal en med rimelige hjelpemidler kunne beregne en knusningssones forløp inn i fjellet, hvor et anlegg er tenkt plassert, må en imidlertid gjøre en antakelse om at sonen er plan (Nilsen & Broch, 2010).

Svakhetssoner av regional karakter viser ofte stor grad av parallellitet over store områder, som kan tyde på dannelse under samme spenningstilstand og på geologisk sett samme tidspunkt. Andre spenningsforhold vil i samme område kunne gi svakhetssoner med annen orientering, og til sammen dannes mer eller mindre parallelle systemer av svakhetssoner et grovt mønster i berggrunnen, vanligvis mer komplisert og med flere systemer jo eldre berggrunnen er. Det er i første rekke den kraftige erosjonen av fjelloverflaten under istiden som er grunnen til at svakhetssonene i berggrunnen i dag fremtrer som kløfter og depresjoner i det topografiske bildet. En kløfts form og dyp vil være avhengig av tre faktorer, nemlig isbreens erosjonskraft,

svakhetssonenes styrke/dens motstand mot erosjon og svakhetssonens fallvinkel (Nilsen & Broch, 2010).

Svakhetssoner kan forårsake betydelige stabilitetsproblemer for gruvedriften. Svakhetssoner kan påvirke den dimensjonerende stabiliteten, krav til sikring, subsidens, raspotensialet og graden av fragmentering. Svakhetssoner er imidlertid en større utfordring i områder med mindre overdekning. På større dyp eller i områder med høye spenninger, er svakhetssonenes påvirkning begrenset og høye spenningskonsentrasjoner er en betydelig større utfordring (Brady & Brown, 2004).

4.2 Bergmassens spenningstilstand

4.2.1 In-situ spenninger

In-situ spenninger refererer til den initiale spenningssituasjonen i område før åpning av rom. For alle underjordiske anlegg vil in-situ spenningene spille en avgjørende rolle for bestemmelse av både orientering og geometri til anlegget og som omtales videre i kapittel 4.2.3. Ved å måle in-situ spenningsfordeling er det mulig å unngå potensielt ustabile situasjoner forårsaket av ugunstige spenningskonsentrasjoner. Bestemte spenningssituasjoner kan imidlertid være gunstige, og bidra til en økt stabilitet. De eksisterende in-situ spenningene vil i stor grad avhenge av den geologiske historien til bergmassen. Det anbefales å gjennomføre målinger av reelle in-situ spenninger, da teoretiske estimater anses som upålitelige for underjordiske konstruksjoner.

I et bergmassiv er spenningstilstanden alltid tredimensjonal, og kan beskrives ved de tre hovedspenningene σ_1 , σ_2 og σ_3 som er henholdsvis minste, mellomste og største hovedspenning. Disse virker på hovedplan der skjærspenninger er lik null. Disse blir i bergmassen ofte omtalt som hovedspenningene σ_v , σ_H og σ_h , henholdsvis vertikalspenningen, og største og minste horisontalspenning.

Vertikalspenningen er et resultat av gravitasjonskraften og er entydig bestemt av vekten av overliggende bergmasser, og er gitt av følgende formel:

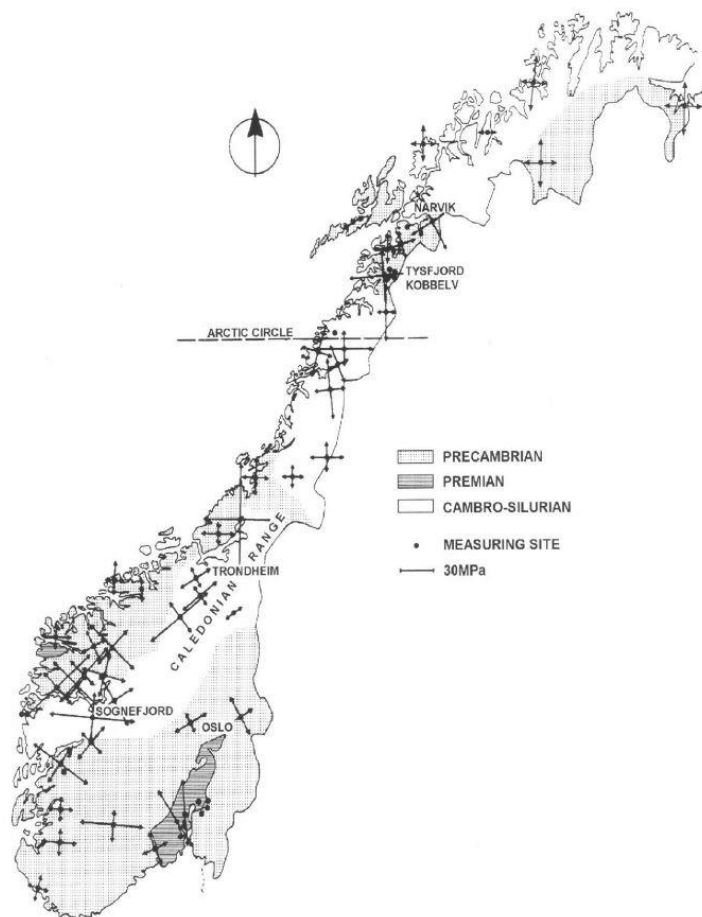
$$\sigma_v = \rho \cdot g \cdot h$$

der ρ er de overliggende bergmassers midlere romvekt, g er tyngdeakselerasjonen og h er dybde under overflaten. Jo dypere ned i bergmassen en beveger seg, vil tverrutvidelsen forhindres, noe som resulterer i spenningen σ_h i horisontalplanet. Den er gitt av følgende formel (A. M. Myrvang, 2001):

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

der ν er Poissons forholdstall. Mange norske bergarter (gneis og granitt) har betydelig lavere forholdstall, der en typisk verdi kan være rundt 0,15 og som gir en tilsvarende horisontalspenning, $\sigma_h \approx 1/6 \cdot \sigma_v$.

Etter hvert som in-situ målinger av bergspenningene har blitt foretatt, har det vist seg at de målte verdiene for vertikalspenningene stemmer rimelig bra med den gravitative teorien. Målinger gjennomført flere steder i Skandinavia har imidlertid vist opptil dobbelt så høy vertikalspenning som overdekningen skulle tilsi, og enda høyere horisontalspenninger. I disse tilfellene er det nærliggende å anta at dette kan skyldes de geologisk betingede spenningene, som inkluderer tektoniske spenninger og residualspenninger (A. M. Myrvang, 2001). Tektoniske spenninger er et resultat av platetektonikken og de horisontale trykkspenningene generert av plater på hver sin side av plategrensen. Residualspenninger er såkalte «innlåste» spenninger som har sammenheng med bergets tidligere historie, og kan være forårsaket av volumforandringer eller hurtig avlastninger (Nilsen & Broch, 2010). Figur 11 viser et forenklet geologisk kart med retning og størrelse på de horisontale spenningene i Norge. I Nord-Norge har de horisontale spenningene en tilnærmet N-S eller Ø-V orientering.



Figur 11 Retninger til horisontalspenninger i Norge (A. M. Myrvang, 2001).

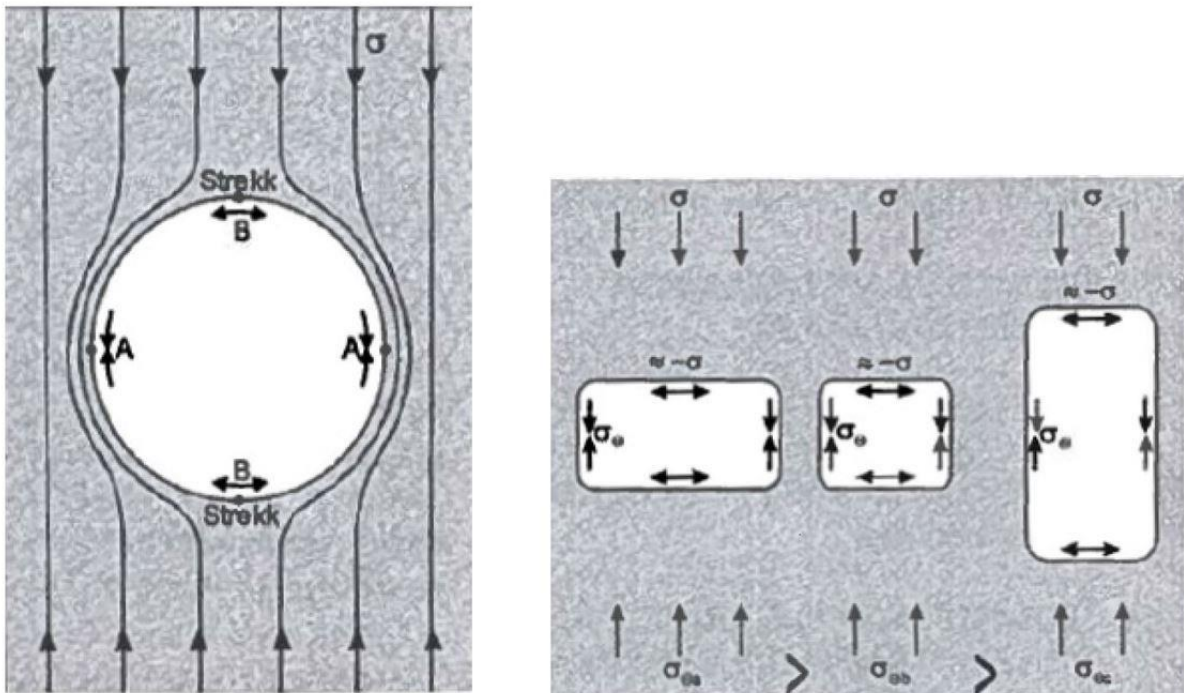
Innflytelse av topografi

Mange steder påvirkes spenningsbildet av topografiske forhold, og gjelder både i vertikal- og horisontalplanet. Mellom to daler eller fjorder vil retningene til hovedspenningene stille seg slik at det nær dalsidene vil være en hovedspenning som står steilt eller parallell overflaten, en hovedspenning parallelt med fjellsiden og hovedspenning normalt på overflaten. I et gravitativt spenningsfelt vil disse hovedspenningene representeres av henholdsvis σ_1 , σ_2 og σ_3 . Etter hvert som en går innover i massivet vil σ_2 og σ_3 bli mer vertikal/horisontal og σ_3 øke noe i verdi, mens σ_1 holder seg noenlunde konstant. Ser man regionalt på det, vil de geologiske spenningene i en viss grad følge landskapet (A. M. Myrvang, 2001)

4.2.2 Spenningsanalyse

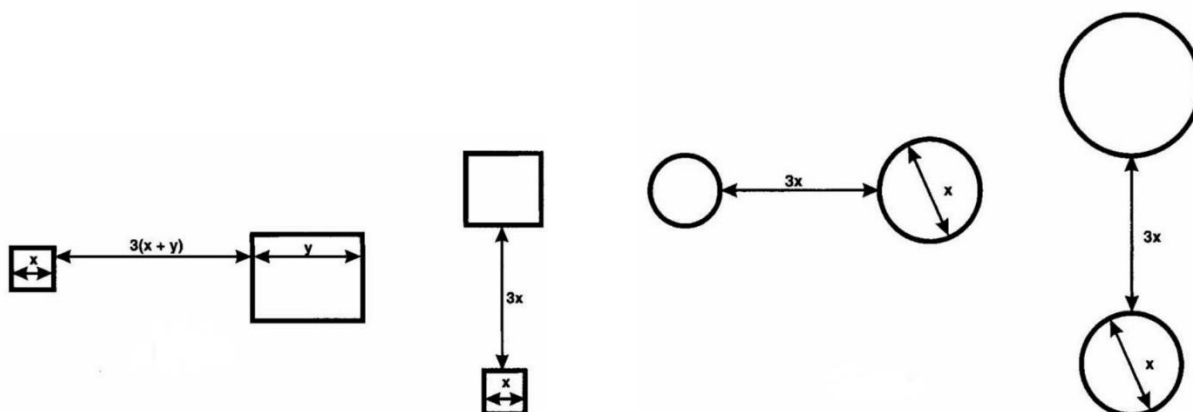
Når et bergrom åpnes, vil det umiddelbart oppstå en endring i det opprinnelige spenningsfeltet. De spenningene som ble tatt opp av den massen som fjernes, må overføres til

de gjenværende massene, og vi får en såkalt spennings-omlagring, vist i Figur 12. I det sirkulære tverrsnittet oppstår spenningskonsentrasjoner i punktene A og tangentielle strekkspenninger i punktene B. De tangentielle strekkspenningene er i tallverdi tilnærmet lik de opprinnelige spenningene, mens trykkspenningskonsentrasjonen i veggene derimot er avhengig av åpningens bredde/høyde-forhold og øker med dette.



Figur 12 Spenningskonsentrasjoner rundt bergrom med ulike tverrsnitt. Til venstre vises spenningsfeltet rundt et sirkulært tverrsnitt, og til høyre vises spenningskonsentrasjoner ved ulike bredde/høyde-forhold (A. M. Myrvang, 2001).

Den relative endringen i spenningskonsentrasjon i trykksonene vil være størst nær åpningen, og allerede en diameter vekk fra åpningen vil innflytelsen fra åpningen være så liten at en i praksis kan se bort fra den. I underjordiske gruver med brytningsmetoden rom og pilar vil det imidlertid forekomme flere parallelle åpninger og som vil, hvis de er nær nok, gjensidig påvirke hverandre (A. M. Myrvang, 2001). Det vil derfor være fornuftig å plassere bergrom i en viss avstand fra hverandre for å begrense samhandlingen av spenninger mellom bergrommene. Alternativt kan bergsikring benyttes for samme formål, men dette vil som regel være mer kostbart. Figur 13 viser anbefalt avstand mellom bergrom med ulike tverrsnitt.



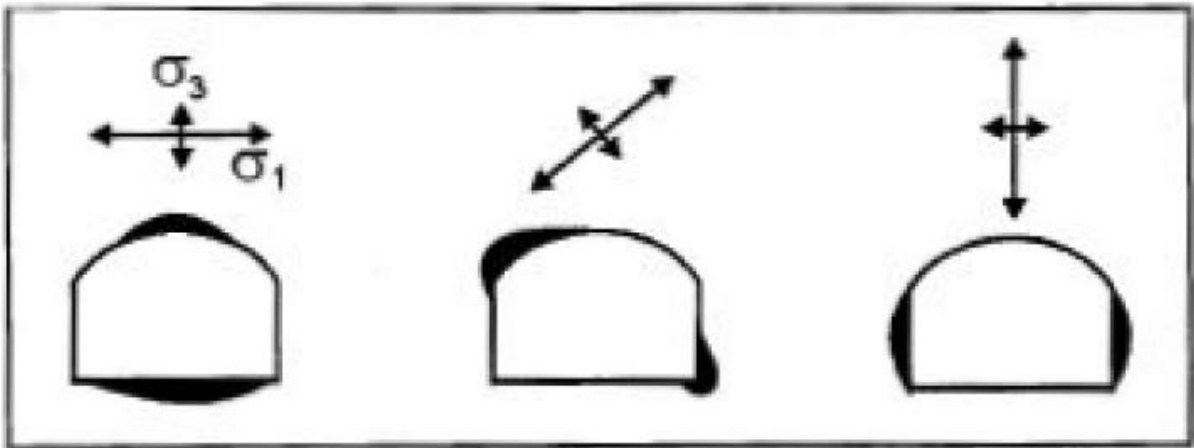
Figur 13 Avstand mellom bergrom (Bullock, 2001).

Spenningstilstand på store dyp

For dyptliggende anlegg, dvs. flere hundre meter under overflaten, er spenningsnivået i bergmassen så høy at det lokalt kan overskride bergartsstyrken. Dette kan føre til nydannelse av sprekker i bergmassen, og i verste fall til bergslag; flak av berget slynges ut med stor hastighet. I mer moderate forhold vil dette bergtrykket føre til avskallinger og ustabile forhold i bergrommets kontur (Nilsen & Broch, 2010).

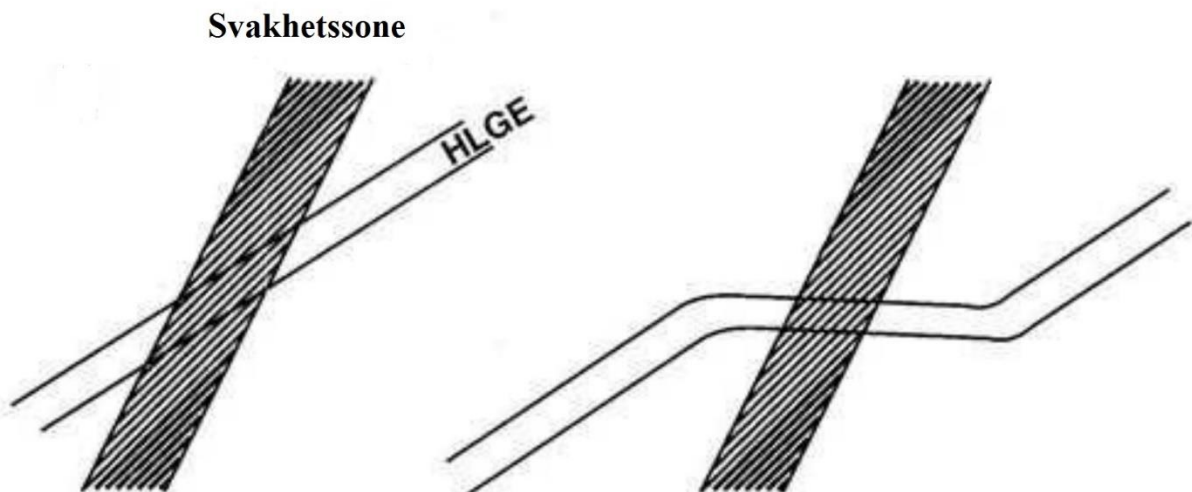
4.2.3 Orientering av bergrom

Etter at den mest gunstige plassen for berganlegget er funnet, er det viktig å ta stilling til hvordan bergrommet skal orienteres, for å oppnå stabilitet. For dypereliggende anlegg, som vil være tilfellet her, spiller bergspenningene en betydelig rolle, og nydannelse av sprekker, sprakeberg og bergslag vil inntreffe der hvor retningen for største hovedspenning tangerer bergrommets periferi, se Figur 14. For å oppnå en gunstig orientering på bergrommet, vil det derfor være nødvendig å minimalisere tangeringsflaten. Den stabilitetsmessige beste orienteringen oppnås når bergrommets lengdeakse danner en vinkel på 15-35° i forhold til retningen til største hovedspenning (Nilsen & Broch, 2010).



Figur 14 Bergtrykksproblemer med varierende orientering av største hovedspenning, σ_1 (Nilsen & Broch, 2010).

Ved kryssning av eventuelle svakhetssoner, er orienteringen av bergrom i forhold til disse av avgjørende betydning for stabiliteten til bergrommet, se Figur 15. Den mest gunstige orientering av bergrom vil være vinkelrett på svakhetssonen (Bullock, 2001).



Figur 15 Vertikalprofil med orientering av bergrom i forhold til svakhetszone. Mindre gunstig løsning er vist til venstre og mest gunstige til høyre. Modifisert fra Bullock (2001).

4.3 Åpningsarbeider

Utvinning av dyptliggende malmforekomster krever etablering av tilstrekkelig infrastruktur for å klargjøre forekomsten for produksjon. En rekke typer åpninger eksisterer og inkluderer blant annet stoller, sjakter og ramper. Åpningenes primære funksjon er å skaffe tilgang til malm og sikre adkomst for gruvearbeidere, utstyr, materiale, strøm, vann og ventilasjonsluft. Samtidig må åpningene planlegges og drives på en måte som tar høyde for de bergmekaniske forhold.

Det eksisterer to metoder for driving av åpninger: konvensjonell driving ved hjelp av boring og sprengning og driving ved hjelp av tunnelboremaskin. Konvensjonell boring og sprengning er en syklisk drivemetode, mens tunnelboremaskinen gir en mer kontinuerlig drift. I gruvesammenheng er det imidlertid konvensjonell boring og sprengning som er mest utbredt, og oppgaven vil også baseres på denne drivemetoden da den vil være aktuell for åpningsarbeidene i Sulitjelma.

4.3.1 Stigningsgrad

Maksimal teoretisk stigning til en anleggsvei begrenses hovedsakelig av veggrepet. For å kunne beregne den maksimale teoretiske stigningen for et kjøretøy basert på veggrepet, må følgende faktorer være kjent: Friksjonskoeffisienten (μ), totalvektens andel på drivhjul (λ) og rullemotstanden f_R . For å kunne kjøre opp en viss stigning må veggrepet være lik den totale kjøremotstanden. Veggrepet kan uttrykkes som:

$$F_\mu = m_d \times g \times \mu = G \times \lambda \times \mu$$

der m_d er kjøretøyets totale masse (kg), g er tyngdeakselerasjonen (m/s^2), og G er kjøretøyets tyngde.

Total kjøremotstand uttrykkes som:

$$M_T = G \times f_T$$

der f_T er total kjøremotstand.

Disse uttrykkene kan settes lik hverandre og vi får at total kjøremotstand, $f_T = \lambda \times \mu$.

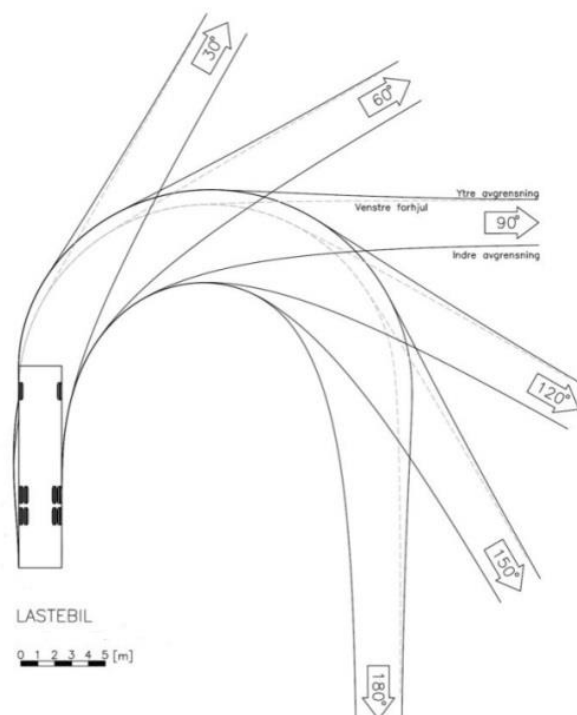
Total kjøremotstand er lik summen av stigningsmotstand og rulle­motstand, og dermed kan vi finne den maksimale teoretiske stigningen, f_G :

$$f_T = f_R + f_G \rightarrow f_G = f_T - f_R$$

Dette er maksimal stigning for en full­stet truck, og det antas at motoren er kraftig nok til å overkomme kjøremotstanden.

4.3.2 Kurveradius

Områder som krever krumning av transportveg, må planlegges slik at det tas høyde for kjøretøyenes minste horisontalkurveradius. En liten kurveradius vil resultere i lave hastigheter og lav transportkapasitet (Olsen, 2009). Et kjøretøys svingeradius er illustrert på Figur 16, som viser en generell sporingskurve for en lastebil.



Figur 16 Sporingskurve for lastebil Statens Vegvesen (2013).

4.3.3 Stabilitetsproblemer og bergsikring

For underjordiske gruver, er det tre hovedtyper stabilitetsproblemer som kan oppstå (Stille, 2001):

- 1) Utfall av blokker som følge av svakhetssoner. Her er gravitasjonen drivkraften og i hvilken retning deformasjoner kan forekomme bestemmes av spenningsfordelingen.
- 2) Skjærbrudd som følge av høye spenningskonsentrasjoner. Herunder brudd i heng og sidevegger som konsekvens av et mindre gunstig tverrsnitt.
- 3) Stabilitetsproblemer som følge av høye spenninger. Her forekommer alt fra mindre skader som for eksempel overflatesprekker og avskalling til betydelig alvorligere skader som bergslag, der store steinflak slynges ut med stor hastighet.

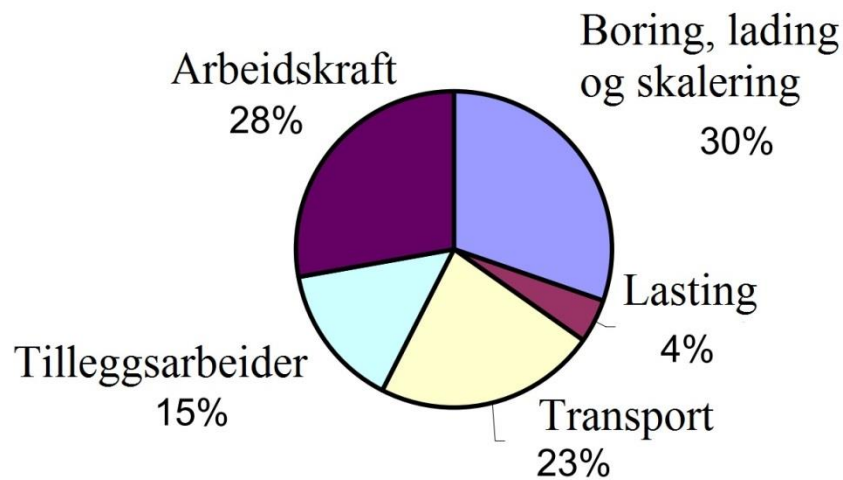
Hvilke sikringsmetoder som tas i bruk, avhenger derfor av de lokale forhold. Bergsikring i gruvedrift kan skille seg en hel del fra konvensjonell bergsikring i tunneldrift, da gruver i mange tilfeller drives på større dyp, men også fordi man etter uttak av malm velger å la deler av gruen gå i kontrollerte ras. Etter hver salve utføres normalt en «driftsrensk» med spett eller hydraulisk hammer for fjerning av løst berg.

I svært kompetent berg kan tak og vegger stå uten ytterligere sikring. I mindre kompetent berg er bruk av bolter i tak og vegger den vanligste metoden for bergsikring, og kan utføres spredt eller systematisk for henholdsvis sikring av enkeltblokker eller sikring av et større parti. Sprøytebetong eller stålnetting kan benyttes for å holde bergmassen på plass mellom boltene (Haugen, 2014).

4.3.4 Kostnadsberegninger

Ved etablering av åpningsarbeider avhenger de grunnleggende kostnadene hovedsakelig av ni følgende faktorer: total lengde på åpningsarbeidene, avstand til tippområde, stigningsgrader, bergmasseegenskaper, inndrift, drivemetode, grad av effektivitet, sprengstoff og prisnivået for anleggsmaskiner. I tillegg kommer elementære kostnader som boring, lading og skalering, lasting, transport, tilleggsarbeider, arbeidskraft og nisjer (Zare, 2007). Figur 17 viser en generell fordeling av kostnader knyttet til åpningsarbeider. Fordelingen antar at transport

gjøres med lastebiler av underentreprenør, dvs. at arbeidskraft er inkludert i transportkostnadene.



Figur 17 Fordeling av kostnader knyttet til åpningsarbeider. Modifisert fra Zare (2007).

4.4 Diamantkjerneboring

Formålet med undersøkelsesboring er å innhente informasjon om størrelse, dybde og mengden av verdifulle komponenter til en forekomst for å kunne bestemme hvorvidt den kan brytes og hvordan. Ved hjelp av diamantkjerneboring kan en oppnå en mest mulig korrekt prøve av en tilnærmet uforstyrret bergmasse. Av de ulike metodene innen undersøkelsesboring er diamantkjerneboring den mest pålitelige måten å skaffe seg informasjon om bergmassen på. Diamantkjerneboring går ut på at en hul borkrone som består av grove industridiamanter sliper ut et ringspor gjennom fjellet. Sylindren innenfor borkronen, kjerneprøven, trekkes så opp med boret. Sylindren er vanligvis 1,5 til tre meter lang, men kan bli opptil seks meter lang.

Diamantkjerneboring gir en svært presis posisjonering av borehullene, og gjør det mulig å foreta nøyaktige observasjoner av bergmassen, både geologisk og strukturelt. Kjerneprøven er også godt egnet for geokjemisk analyse (Marjoribanks, 1997). Metoden er imidlertid kostbar, og det krever en del forberedelsesarbeider i forbindelse med plassering av borehullene. Det er derfor viktig at boringen gjennomføres kontrollert og nøyaktig for å oppnå maksimalt utbytte.

4.4.1 Plassering av borehull

Plassering og retning på et borehull avhenger i stor grad av hvilken kjennskap man har til den potensielle forekomsten som skal undersøkes. For å kunne skaffe en mest mulig nøyaktig prøvetaking for bestemmelse av gehalten til en malmforekomst, bør borehullene generelt rettes slik at de skjærer malmforekomsten med størst mulig vinkel, og ideelt sett, treffe vinkelrett på.

Dersom hensikten med boringen primært er å treffe en mineralisert sone, bør borehullene plasseres slik at de skjærer under det antatte nivået til den oksiderte sonen. Dersom forekomsten er flat med en bratt helning, bør borehullene ideelt sett treffe forekomsten med en vinkel motsatt av helningsvinkelen til forekomsten. Hvis forekomstens helning derimot ikke er kjent eller har en uregelmessig form, bør det foretas minst to borehull med motsatt helning og med skjæring under malmkroppen, for å sikre skjæring med malmforekomsten. Flatliggende forekomster undersøkes følgelig med vertikale borehull (Marjoribanks, 1997).

Undersøkelsesboring starter gjerne med noen få borehull for å finne ut om det er tilstedeværelse av mineralisering. Generelt kreves det en rekke borehull over flere borefaser for å kunne oppnå et fullstendig bilde av forekomstens utstrekning og form. Borehull plasseres gjerne i et gitt boremønster, der avstanden mellom borehull og boremønsterets utstrekning avhenger av forekomstens størrelse (Constantia Resources Ltd.).

5 Metode

5.1 Terrenganalyse

Som et ledd i det innledende studiet er overflatestrukturer blitt kartlagt og analysert ved hjelp av en digital terrengmodell. Dette er en viktig del av forundersøkelsene ved planlegging av anlegg i berg, da svakhetssoner og sprekker kan ha stor innvirkning på drifts- og stabilitetsforhold i et berganlegg (Nilsen & Broch, 2010). En terrenganalyse i det geografiske informasjonssystemet ArcGIS 10.2 gjør det mulig å studere terrengmodeller ut ifra en rekke egenskaper, deriblant detaljerte undersøkelser av overflatestrukturer. Terrengmodellen beskrevet i kapittel 3.1 er blitt brukt som inndata for terrenganalysen. Koordinatsystemet brukt i terrenganalysen er WGS 1984 UTM Sone 33N. Følgende funksjoner i ArcGIS ble benyttet i terrenganalysen:

Slope (helning)	Angir den førstederiverte (helningsvinkelen) til enhver celle.
Aspect (helningsretning)	Angir retningen til helningene.
Curvature (krumning)	Angir den andrederiverte til enhver celle.
Hillshade (skyggerelieff)	Angir skyggerelieff fra lyskilde i en gitt vinkel.

Slope-funksjonen angir med andre ord stigningsfrekvensen til terrenget i z-retning, aspect-funksjonen hvilken retning terrenget faller, mens curvature-funksjonen gir informasjon om hvorvidt terrenget er konvekst eller konkavt i et område. Kombinasjonen av disse vil kunne identifisere eventuelle svakhetssoner, og andre strukturelle elementer som kan være av betydning for fremtidig åpningsarbeider. Eventuelle funn gjort fra terrenganalysen presenteres i kapittel 6.1.

5.2 3D-modellering

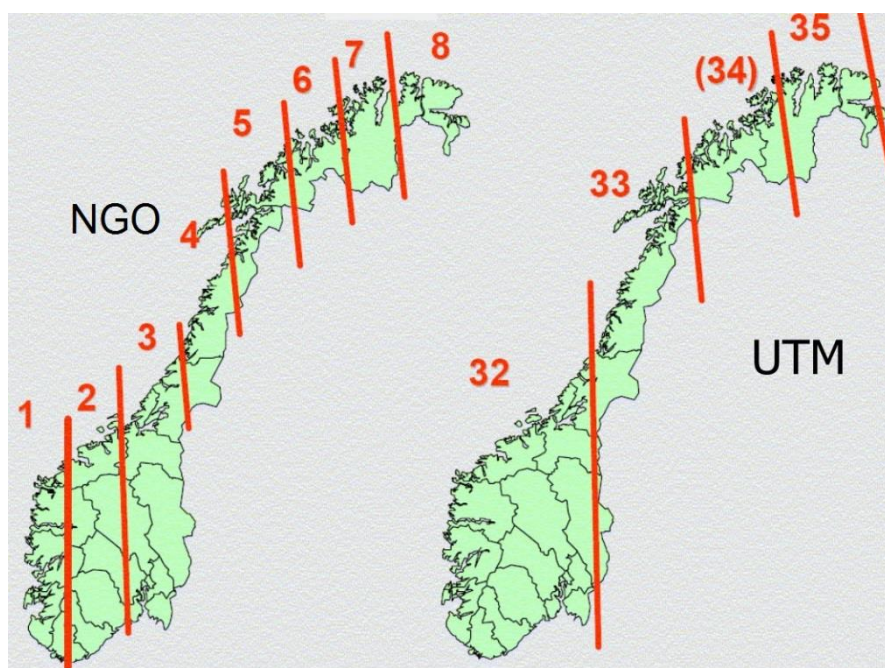
Som forutsetning for å kunne lage et forslag til en skjematisk layout av adkomststoll, undersøkelsesboring og rampe, er det blitt gjort en identifisering og digitalisering av konturene til de eksisterende gruverommene, Rupsi-stollen og Rupsi-forekomsten i Nordgruvefeltet. I tillegg er geologiske vertikalprofil blitt digitalisert og lagt inn i modellen for å få en bedre forståelse av geologien i det aktuelle området. Til dette har programvarene Microstation og Leapfrog Geo blitt anvendt.

Opprettelse av en 3D-modell kan gjøres ved hjelp av en punktsky, det vil si en sfære av punkter med sine respektive koordinater i x-, y- og z-retning. I oppgaven er punktstyker blitt laget ved hjelp av programvaren Microstation v8i, en av de største aktørene innen CAD-modellering. Programvaren er utviklet for design og utarbeidelse av infrastruktur, bygg og anlegg i 2D og 3D. Microstation støtter flere rasterformat, blant annet flyfoto, satellittbilder, skannede kart og tegninger (Bentley Systems, 2015).

Det har blitt utarbeidet en punktsky for hvert «nivå», eller hver gruve, og for simulering av disse i 3D har programvaren Leapfrog Geo blitt benyttet. Leapfrog Geo er et produkt av programvarepakken til Leapfrog, et selskap som leverer geologiske modelleringssystemer i 3D. Ved bruk av interpoleringsprinsipper gjør programmet det mulig å produsere og jobbe med geologiske modeller (Ramlo, 2014). Programmet spiller en sentral rolle i forståelsen av den totale strukturen til det aktuelle området. Prosedyren i Microstation og Leapfrog for digitalisering av gruverom og Rupsi-stollen er beskrevet i følgende punkter:

- Gruvekartene over Nordgruvefeltet (Vedlegg 1-Vedlegg 4) ble lagt inn i Microstation og georeferert i henhold til NGO-koordinatsystemet med aksenummer fem, se Figur 18. Til dette formålet krevdes transformasjon av to punkter på kartet fra lokale koordinater til NGO-koordinater. Disse er oppgitt i Tabell 2.
- Punktstykene ble etablert ved at punkter på kartet med kjent høyde ble registrert og overført til et excel-dokument som ble lagret som en kommaseparert fil (csv.) for å kunne importeres inn i Leapfrog. Punktstykene er vist i Vedlegg 19, med tilhørende NGO-koordinater listet opp i Vedlegg 20-Vedlegg 25.
- I Leapfrog ble det generert en flate fra punktene, det aktuelle gruvekartet ble drapert opp mot flaten og deretter avgrenset innenfor gruverommets kontur.

- Geologiske vertikallprofiler ble lagt direkte inn Leapfrog som bildeforformat og georeferert vha. tre kjente punkter med samme prosedyre for transformering av koordinater.
- Konturflaten til Rupsi-forekomsten ble opprettet fra påtegnede polylines på de vertikallprofilene som viser malm fra Rupsi-forekomsten, vist i Vedlegg 15 - Vedlegg 18.



Figur 18 Akser i NGO-koordinatsystemet med tilsvarende soner i UTM-koordinatsystemet (Godager, 2006). Sulitjelma befinner seg i henholdsvis sone 5 og 33.

	X (Lokal)	Y (Lokal)	X (NGO)	Y (NGO)
Bursi	-2400	2700	-38416,7171	1020542,95
	-200	900	-36242,3468	1018711,74
Giken/Charlotta	400	2300	-36422,4522	1020114,54
Nedre	1900	1300	-34136,7191	1019081,89
Giken/Charlotta	-500	900	-36542,3389	1018716
Øvre	1800	-300	-34250,9232	1018083,34
Ny Sulitjelma og	4500	1500	-31533,9459	1019244,95
Hankabakken	2300	300	-33750,9362	1018076,24

Tabell 2 Transformasjon av lokale koordinater til NGO-koordinater. Merk at y-koordinaten i det lokale koordinatsystemet er i retning øst-vest, mens x-koordinaten er i retning nord-sør.

5.3 Numerisk analyse

Numerisk analyse er benyttet for det formål å skaffe et inntrykk av spenningsbildet utenfor gruverommene og hvor langt unna disse en eventuell rampe kan plasseres for å unngå å bli påvirket av disse. I tillegg er numerisk analyse benyttet for å undersøke hvorvidt en fremtidig adkomststoll påvirkes av den eksisterende klorittsonen.

5.3.1 Generelt

Numerisk analyse kan bl.a. benyttes for å undersøke spenningsfordelinger og deformasjoner rundt underjordiske åpninger. Bergmekaniske situasjoner kan innebære en rekke parametere og en kompleks geologi, som til sammen gjør det svært vanskelig å gjennomføre en matematisk vurdering manuelt. Følgelig er programvarer utviklet for modellering av en definert geometri innen en tolket, geologisk situasjon. Hovedprinsippet bak numerisk modellering er å utføre en diskresjon av bergmassen til en rekke, små elementer der de individuelle egenskaper beregnes. Numerisk modellering kan deles inn i to hovedtyper (Nilsen & Palmstrøm, 2000):

- Kontinuerlige modeller
- Diskontinuerlige modeller

Ved kontinuerlig modellering behandles bergmassen som et kontinuerlig medium gjennomsatt av et begrenset antall diskontinuiteter, og er den mest vanlige måten å modellere på. Eksempler på slike modeller er endelig elementmetoden (FEM), endelig differansemetoden (FDM) og grenseelementmetoden (BEM). Hovedforskjellen mellom disse representeres av hvilken del av modellen som er diskreditert. For differensialmodeller er hele bergmassen diskreditert, mens kun grensene er diskrediterte for integrerte modeller.

Examine2D som er programvaren brukt til den numeriske analysen er basert på grenseelementmetoden. Programvaren er utviklet av Rocscience, og er et to-dimensjonalt endelig element modelleringsprogram, som gjør det mulig å gjennomføre elastiske spenningsanalyser i og rundt bergrom med ulike bruddkriterier som Hoek-Brown og Mohr Coloumb (Rocscience).

5.3.2 Bruddkriterier

Bruddkriterier blir brukt for å kartlegge og forutsi eventuelle brudd som oppstår rundt et bergrom. For en numerisk analyse, er det nødvendig med et bruddkriterium som situasjonen kan evalueres opp mot. En rekke teorier eller kriterier som forsøker å forklare eller forutsi, når og hvorfor brudd oppstår i materialer er utviklet ved å anta at bruddet skjer ved en bestemt mekanisme, når en bestemt mekanisk størrelse overskrides. Eksempler på klassiske bruddkriterier er Tresca-kriteriet, Mohr-Coulomb, von Mises og Drucker-Prager (A. M. Myrvang, 2001). Den numeriske analysen baseres på Hoek-Brown kriteriet, et rent empirisk bruddkriterium som fastslår styrken til bergarter på grunnlag av største og minste hovedspenning. Det generaliserte Hoek-Brown kriteriet er gitt ved følgende formel (Evert Hoek, 2001):

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

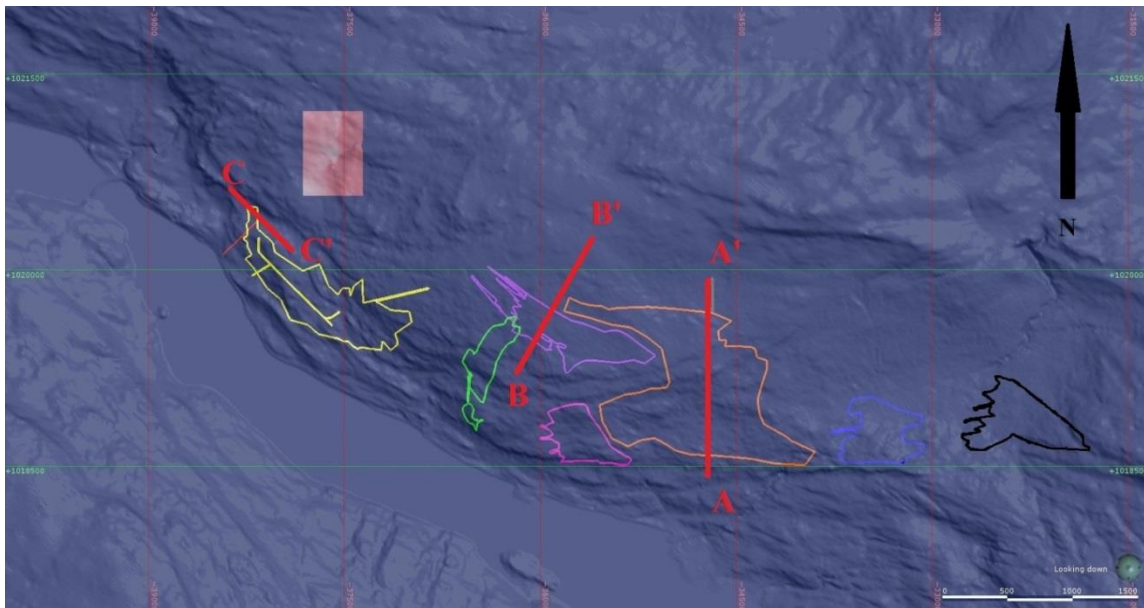
der σ'_1 og σ'_3 er største og minste effektivspenning ved brudd, σ_{ci} er enaksial trykkfasthet og m og s er empiriske konstanter basert på bergmassekvalitet. Hoek-Brown kriteriet antar isotropisk bergmassekvalitet, og bør derfor kun brukes til bergmasse med et tilstrekkelig antall sprekkesett.

5.3.3 Profiler

I denne oppgaven er analysen blitt utført elastisk, med formålet om å kalkulere sikkerhetsfaktoren, F , da bergmassen i teorien ikke kan gå i brudd. Sikkerhetsfaktoren representerer forholdet mellom materialstyrken til bergarten og de induserte spenningene og brukes til å beskrive den strukturelle kapasiteten til bergmassen som overskrider den forventede belastningen. Bergmasse med $F < 1$ ville gått i brudd dersom analysen hadde blitt gjennomført plastisk, med mindre sikringstiltak blir gjennomført. En analyse av sikkerhetsfaktoren vil med andre ord angi utstrekningen for en eventuell bruddsone i et gitt scenario.

Tre profiler har vært gjenstand for en enkel analyse i Examine 2D, og profilenes plassering fremgår av Figur 19. Profilene A-A' og B-B' ble valgt av hensyn til omtrentlig beliggenhet til en fremtidig rampe, og som følgelig inneholder de gruverommene som kan tenkes å ha en

stabilitetsmessig innvirkning på denne. Profil A-A' og B-B' omfatter henholdsvis gruverommene Nedre Charlotta og Giken. Profil C-C' skjærer den planlagte adkomststollen helt i enden av Rupsi-stollen, der det eksisterer en klorittsone. Analysen av profil C-C' vil kunne indikere hvorvidt denne sonen påvirker adkomststollen, og eventuelt hvilke sikringstiltak som vil være nødvendig for å hindre at brudd forekommer. Dimensjonerende størrelser for modellene i de ulike profilene er listet opp i Tabell 3.



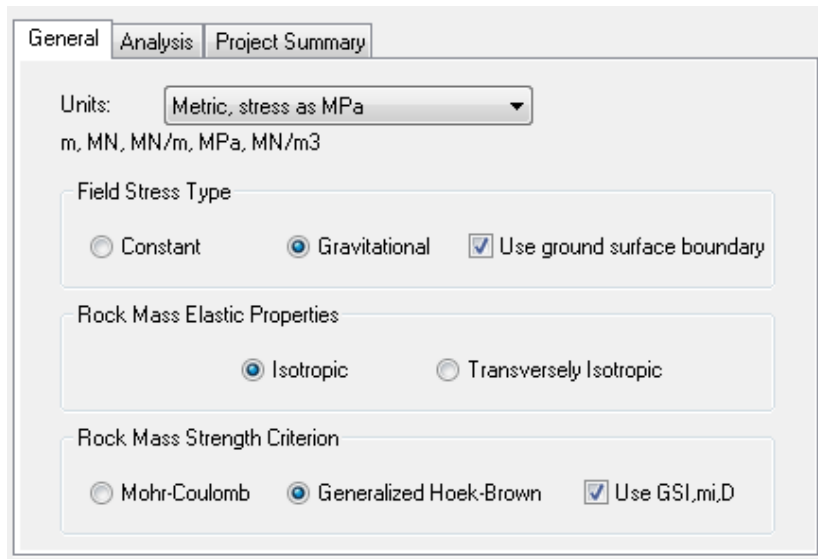
Figur 19 Omtrentlig plassering til de analyserte tverrsnittene. Profil A-A' går gjennom Giken (oransje), profil B-B' gjennom Nedre Charlotta (lilla) og profil C-C' skjærer den planlagte adkomststollen. Modifisert figur fra Leapfrog.

Profil	Modell	Lengde [m]	Høyde [m]	Fallvinkel
A-A'	Giken gruve	1100	3,5	29°
B-B'	Nedre Charlotta	337	3,5	24°
C-C'	Adkomststoll	5 (bredde)	7	-

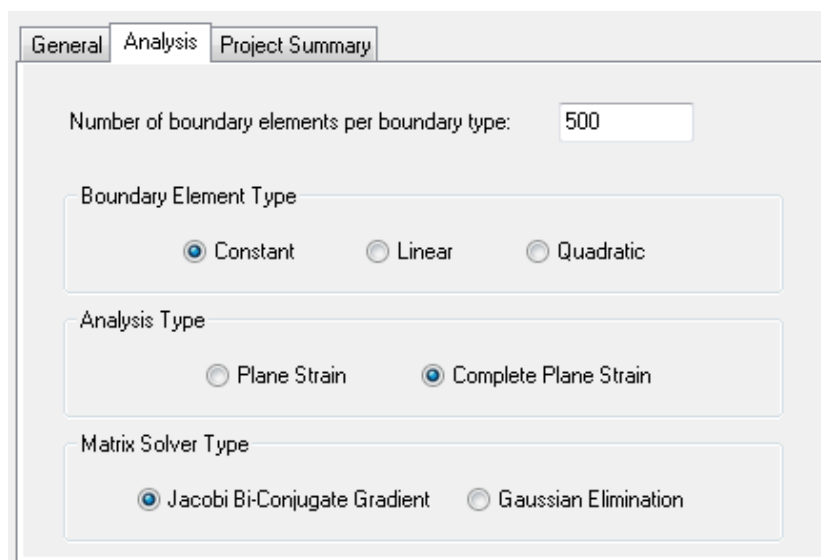
Tabell 3 Dimensjoner for de numeriske modellene i Examine2D.

Standardinnstillingene valgt for analyse av profilene A-A' og B-B' er anvist på Figur 20 og Figur 21. Her kan det nevnes at det for generelle standardinnstillinger er blitt valgt å gjennomføre analysen i et gravitativt spenningsfelt. Grunnen til dette er at modellene i disse profilene er relativt store, og et konstant spenningsfelt er bedre egnet for mindre modeller. Ved å velge et gravitativt spenningsfelt, antar en at in-situ spenningene varierer lineært med

dybden. Det gravitative spenningsfeltet gjorde det også mulig å legge inn en forenklet versjon av overdekningen. Avstander mellom modell og det aktuelle bergrommet ble hentet fra Leapfrog og lagt inn i modellen. For de analytiske standardinnstillingene ble analysetypen «Complete Plane Strain» valgt. Dette for å kunne ta høyde for hovedspenningsretninger som ikke nødvendigvis er parallelle med modellens lengdeakse, men som har vilkårlige orienteringer i forhold til denne.



Figur 20 Generelle standardinnstillinger brukt til den numeriske analysen. Hentet fra Examine2D.



Figur 21 Analytiske standardinnstillinger brukt til den numeriske analysen. Hentet fra Examine2D.

For profil C-C' ble det valgt å gjennomføre analyse i et konstant spenningsfelt. For profil C-C' er modellen betydelig mindre enn de i profil A-A' og B-B', og vil derfor ikke ha noen vesentlig innvirkning på spenningsfeltet. I tillegg ble det valgt å endre analysetypen «Complete Plain Strain» til «Plain Strain». Etersom profil C-C' ligger normalt på de andre, antas det at én av hovedspenningsretningene er parallell med modellens lengdeakse. «Plain strain» er for øvrig den vanligste analysetypen som benyttes i 2D numerisk modellering.

Når en numerisk modell først er etablert er det enkelt å endre inngangsparametere, og gjennomføre parameterstudier for å studere den generelle effekten av ulike parametere (A. M. Myrvang, 2001). Parameterstudier av enaksial trykkfasthet og GSI-verdier er derfor blitt gjennomført for å illustrere parameterens innvirkning på resultatene, da disse verdiene anses som høyst usikre. For profilene A-A' og B-B' ble de samme inngangsparametere benyttet, mens for profil C-C' ble disse noe endret grunnet profilets beliggenhet i klorittsonen. I det følgende delkapittelet presenteres inngangsparametere brukt i den numeriske analysen, og grunnlaget for bestemmelse av disse. Resultatene fra den numeriske analysen presenteres i kapittel 6.3.

5.3.4 Inngangsparametere

Ved gjennomføring av numerisk analyse er det avgjørende å kunne gjenspeile geologien i området så nøyaktig som mulig for å oppnå tilfredsstillende resultater. Med andre ord, gyldig inngangsdata er nødvendig for en meningsfylt analyse. I denne analysen har imidlertid flere av de bergmekaniske parameterne vært vanskelige å kvantifisere, grunnet mangel på laboratorieundersøkelser i området og generelt en begrenset kunnskap om geologien i området.

For den numeriske analysen er det in-situ bergspenninger og styrkeegenskaper som har vært de viktigste inngangsparametere. Elastiske parametere og sprekkeegenskaper er det ikke blitt gjort noen vurdering av, da analysen kun tar for seg sikkerhetsfaktor, og ikke deformasjoner i bergmassen. Av styrkeegenskapene er det enaksial trykkfasthet (σ_{ci}), Geological Strength Index (GSI), Hoek-Brown konstanten (m_i) og forstyrrelsesfaktoren (D) som har vært nødvendig å estimere. Da det ikke foreligger borekjerner for laboratorieundersøkelser, er alle styrkeparametere blitt bestemt ut ifra klassifiseringssystemer. Enaksial trykkfasthet, σ_{ci} ,

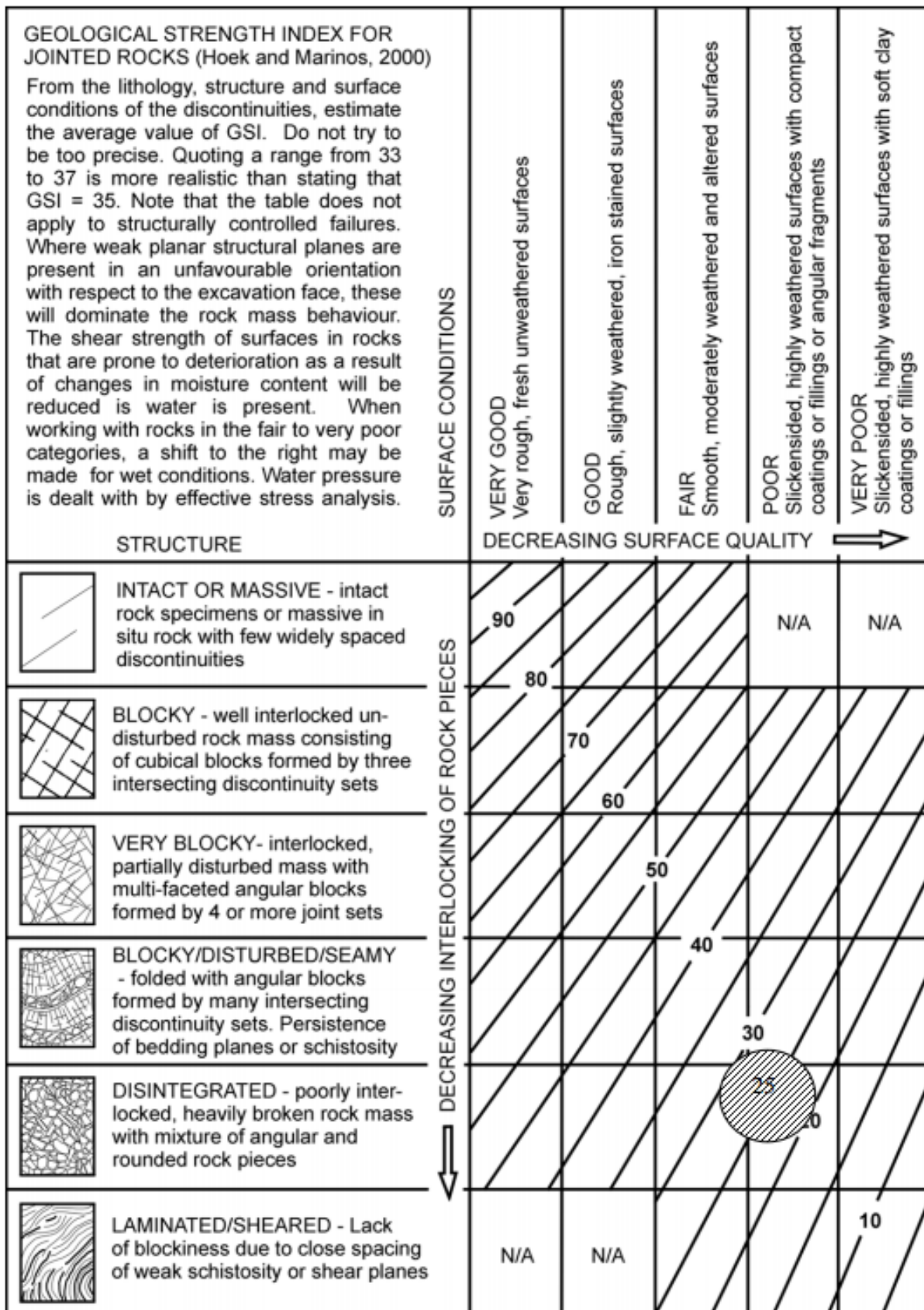
defineres som materialets evne til å motstå last før det går i brudd, og verdien gir en grov estimering av styrken til bergarten. Bestemmelse av trykkfastheten er basert på klassifiseringsskjemaet vist i Figur 22. GSI er et bergmasseklassifiseringssystem der verdien baseres på en visuell inspeksjon av litologi, struktur og sprekkeoverflatens karakteristikker (Marinos, Marinos, & Hoek, 2005). Klassifiseringsskjemaet kan sees i Figur 23. Konstanten m_i er blitt bestemt basert på antakelsen av hva slags bergart som befinner seg i det aktuelle området. Denne, sammen med forstyrrelsesfaktoren, D , er bestemt ut i fra tabellene i Vedlegg 26 og Vedlegg 27.

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

* Grade according to Brown (1981).

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

Figur 22 Skjema for estimering av enaksial trykkfasthet, σ_{ci} , for den numeriske analysen (E. Hoek & Brown, 1997).



Figur 23 Klassifiseringskjema for GSI brukt for den numeriske analysen (E. Hoek & Brown, 1997).

Profil A-A' og B-B'

Spenningsbildet ble satt ut ifra spenningsmålingene beskrevet i kapittel 3.3, der største og minste hovedspenning ble dekomponert slik at største horisontalspenning (σ_H) ble satt til 12 MPa, vertikalspenningen (σ_v) til 21 MPa og σ_2 med retning ut av planet til 9,6 MPa. Basert på den tilgjengelige geologiske informasjonen ble det antatt at store deler av rampen vil gå gjennom den såkalte Furulundskiferen, og bergartstetthet og verdier av trykkfastheten ble satt til å være henholdsvis $0,027 \text{ MN/m}^3$ og 50-80 MPa. Resultatene fra terrengeanalysen indikerte et regionalt bruddmønster i retning ØNØ-VSV og da profilene har en orientering tilnærmet parallelt med denne vil en kunne forvente en lavere GSI-verdi. GSI-verdiene er derfor ikke blitt satt til noe høyere enn 60 MPa. Materialkonstanten m_i ble satt til å være 10, igjen på grunnlag av antakelsen om at skifer er den dominerende bergarten i området. Forstyrrelsesfaktoren, D, ble valgt til å være 0,5 da det er blitt registrert tilfeller av skviseberg som har ført til noe heving av sålen i deler av gruvene (Li, 2015). En totaloversikt over bergartsparameterne som ble benyttet i analysen av profilene A-A' og B-B' fremgår av Tabell 4.

Parameter	Symbol	Verdi
Bergartstetthet	γ	$0,027 \text{ MN/m}^3$
Vertikalspenning	σ_v	21 MPa
Største horisontalspenning	σ_H	12 MPa
Minste hovedspenning	σ_2	9,6 MPa
Young's modulus	E	10 GPa
Poissons rate	ν	0,25
Enaksial trykkfasthet	σ_{ci}	50, 60 og 80 MPa
Geological Strength Index	GSI	50 og 60 MPa
Konstant	m_i	10
Konstant	D	0,5

Tabell 4 Bergartsparametere for analysene av profilene A-A' og B-B' i Examine2D.

Profil C-C'

Da den numeriske analysen av profil C-C' er blitt gjennomført i et konstant spenningsfelt, ble vertikalspenningen beregnet ut ifra bergartstetthet og overdekning lik $0,027 \text{ MN/m}^3$ (skifer) og 155 meter. Med en vertikalspenning lik 4,2 MPa, ble det fra målingene beskrevet i kapittel 3.3, gjort en antakelse om at $\sigma_1 = \sigma_z = 0,5 * \sigma_v = 2,1 \text{ MPa}$. Profil C-C' er plassert betydelig gunstigere sammenliknet med profilene A-A' og B-B', nemlig vinkelrett på bruddmønsteret, og GSI-verdien er derfor satt til å være 80 MPa. Derimot er den intakte bergartsstyrken forventet å være noe lavere her enn i de andre profilene grunnet skjæring med klorittsonen, og den enaksiale trykkfastheten er derfor satt til å være mellom 30 og 50 MPa. Konstanten m_i og forstyrrelsesfaktoren D, ble i likhet med inngangsparameterne brukt i profilene A-A' og B-B' satt til å være henholdsvis 10 og 0,5 (Li, 2015) da det også i Rupsi-stollen er blitt registrert tilfeller av skviseberg som har ført til gulvheving. En totaloversikt over bergartsparameterne som ble benyttet i analysen av profilet C-C' fremgår av Tabell 5.

Parameter	Symbol	Verdi
Bergartstetthet	γ	$0,027 \text{ MN/m}^3$
Største hovedspenning	σ_1	2,1 MPa
Minste hovedspenning	σ_3	4,2 MPa
Spenning ut av planet	σ_z	7 MPa
Young's modulus	E	10 GPa
Poissons rate	ν	0,25
Enaksial trykkfasthet	σ_{ci}	30, 40 og 50 MPa
Geological Strength Index	GSI	80 MPa
Materialkonstant	m_i	10
Forstyrrelsesfaktor	D	0,5

Tabell 5 Bergartsparametere for analysen av profil C-C' i Examine2D.

5.4 Layout

Etter digitalisering av gruverommene i Nordgruvefeltet i Leapfrog, ble programvaren benyttet for opprettelse av en skjematisk layout for forslag til adkomstløsning og undersøkelsesboring. Programvaren har den innebygde funksjonen «Plan Drillhole», som gjør det mulig å legge inn borehull ved å spesifisere blant annet startpunkt, asimut og fall til borehullet. Funksjonen har derfor vært gunstig for etablering av både adkomststoll, boreort, borehull og rampe. Layout i Leapfrog ble laget med den hensikt å oppfylle følgende:

- Konstruere adkomststoll fra den eksisterende Rupsi-stollen som tar høyde for stigningsgrad.
- Etablere en fornuftig løsning for diamantboring på Rupsi-forekomsten med hovedvekt på å skaffe informasjon om forekomstens utstrekning i nordvestlig retning.
- Etablere videre adkomst i form av en rampe fra hengsiden av Rupsi-forekomsten og ned til bunnen av Charlotta gruve og forlengelsen av Giken-forekomsten, nærmere bestemt 677 meter under Langvannet (550 muh.)

Adkomststollen og rampen må avveie drivekostnader og transportkostnader, ta hensyn til stigningsgrad og minste horisontale kurveradius og plasseres i tilstrekkelig sikker avstand fra utdrevne gruverom, da spesielt nedre Giken og Charlotta, med tanke på stabilitet.

Minste horisontalkurveradius og den maksimale teoretiske stigningen er basert på det antatt største kjøretøyet som vil operere i gruen. For driving vil det mest sannsynlig være aktuelt å benytte dumpere med lastekapasitet på 35-36 tonn. I produksjonsfase vil dumpere bli erstattet med lastebiler og/eller semitrailere grunnet kjøring på offentlig veg, og for å oppnå større hastighet og lastekapasitet. Det antas at en Volvo FH 16 vil bli benyttet for malmtransport og som i denne oppgaven vil være det antatt største kjøretøyet. En Volvo FH 16 har i følge spesifikasjonene vist på Vedlegg 31 en svingeradius på 14,1 meter, og derfor ble minste horisontale kurveradius satt til å være 8 meter.

Ved å benytte verdiene oppgitt i Tabell 6 er den maksimale teoretiske stigningen, f_G , blitt beregnet ved hjelp av formelen beskrevet i kapittel 4.3.1. Det er foreløpig ukjent hva slags vegdekke som skal benyttes og hvilken kvalitet denne vil inneha. Det må derfor gjøres en del

antakelser for veggrepet. Rullemotstand er hovedsakelig avhengig av underlagets kvalitet, og fuktig veg i Sulitjelma-bergarter kan komme opp i 9-10 %. Det er vanlig å anta en friksjonskoeffisient på 0,4 på god veg og ned til 0,25 på våt og dårlig veg (Bruland, 2015). Basert på denne informasjonen er det valgt å operere med en rullemotstand på 9 % og en friksjonskoeffisient på 0,3. Med en totalvekts andel på drivhjul lik $2/3$, blir den maksimale teoretiske stigningen lik 0,11 som tilsvarer en stigning 1:9 (11 %).

Rullemotstand [%]	9
Friksjonskoeffisient, μ	0,25
Totalvekts andel på drivhjul, λ	$2/3$

Tabell 6 Inngangsparametere for beregning av maksimal teoretisk stigning (Bruland, 2015).

Dette stemmer godt overens med det som er vanlig i praksis for anleggsveger, som er stigninger mellom 1:10 til 1:8 (10-12,5 %). Kapasitetsmessig er det mer lønnsomt å etablere bratte veger enn å øke lengden (Olsen, 2009). Det er imidlertid valgt å utarbeide to alternativer for adkomststoll, undersøkelsesboring og rampe. Det ene er konstruert med stigning 1:8 (12,5 %) og det andre med stigning 1:10 (10 %).

Resultatene fra den numeriske analysen er blitt lagt inn i Leapfrog ved å bruke en distansefunksjon som gjør det mulig å etablere avstandsbuffer, et volumelement som visualiserer det området utenfor de digitaliserte gruverommene Giken og Charlotta som potensielt kan gå i brudd og som følgelig «hindrer» rampen i å havne innenfor ustabile områder.

Det er viktig å understreke at det finnes utallige alternativer for konstruering av adkomststoll, undersøkelsesboring og rampe i Leapfrog. Gitt de to stigningene er det imidlertid forsøkt å finne optimale løsninger i henhold til drivekostnader og gunstig plasseringer for undersøkelsesboring av Rupsi-forekomsten. Layout for forslag til adkomstløsninger for fremtidig brytning av forekomstene Rupsi, Giken og Charlotta, samt forslag til løsning for oppboring av Rupsi-forekomsten i Leapfrog presenteres i kapittel 6.4.

6 Resultater

6.1 Svakhetssoner

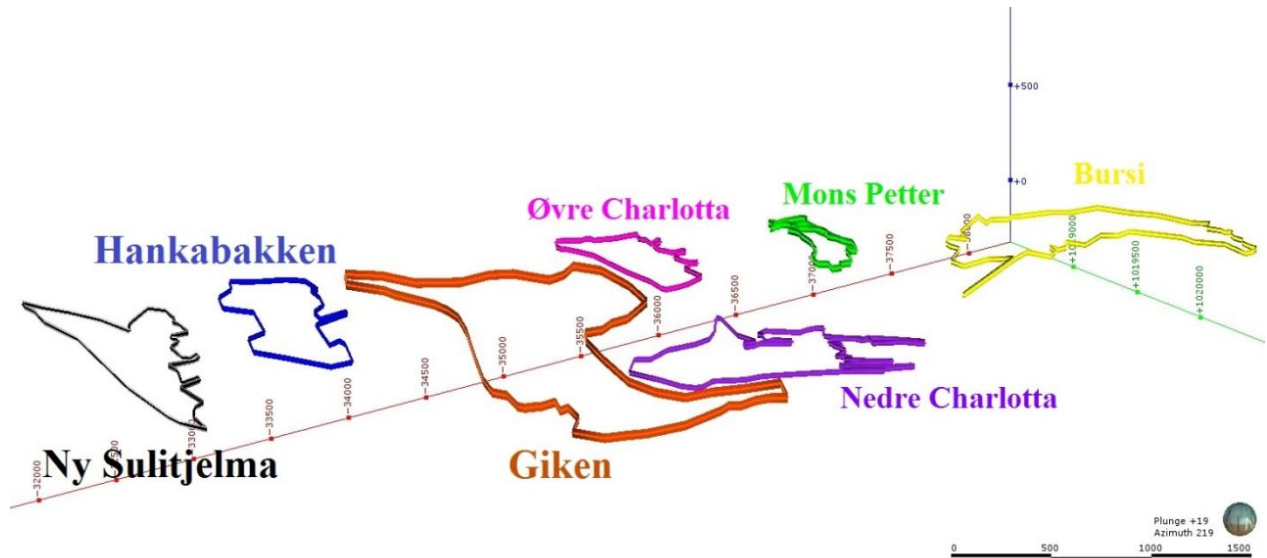
Nordgruvefeltet har generelt varierende topografi, med laveste punkt på 127,42 moh. (Langvannet) og høyeste punkt på 1164 moh. (Raudtind). Ved hjelp av slope-funksjonen i ArcGIS kommer topografiske trekk tydeligere frem på kartet, og forkastninger kjennetegnes gjerne ved bratte helninger med samme orientering. Slope-kartet er vist i Vedlegg 28. Oppover dalsiden fra Langvannet vises en konsentrasjon av flere bratte hyller/benker som følger Langvannets strøkretning med fall 48-75°. Lenger oppover avtar topografien og området preges i større grad av et viddelandskap. Gjennomsnittlig skråningsvinkel i området er 14,24°.

På aspektkartet vises ikke topografien like godt, derimot kommer strukturer i terrenget som rygger, daler, skråninger og svakhetssoner osv. ofte klart frem som en tydelig grense mellom forskjellige farger. Aspektkartet er vist i Vedlegg 29. De mest fremtredende strukturene på aspektkartet er Rupsielva, Gikenelva, en fjellrygg og en potensiell svakhetszone som kan indikere en normalforkastning eller knusningssone. Alle ligger langs grenser som er adskilt med blåfarger på den ene siden og rød/rosa-farger på den andre siden og som viser til helningsretninger mot henholdsvis SSV og NNV. Disse strukturene er også anvist på vedlegget.

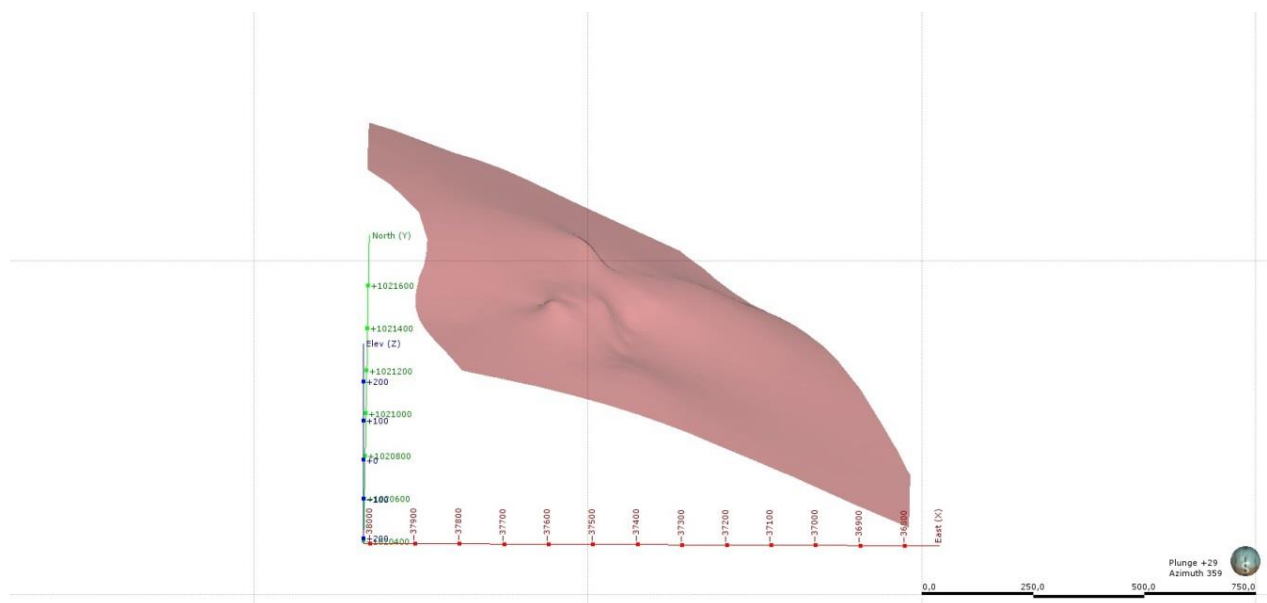
Curvature-funksjonen gir ett inntrykk av kurvaturen til terrenget, og bidrar til en mer kontinuerlig og tydelig visualisering av de mest karakteristiske overflatestrukturene. Fra dette kartet kan Rupsielva, Gikenelva og hyllene langs fjellsiden sees som tydelige lineære søkk i terrenget, vist i Vedlegg 30.

6.2 3D-modell

3D-modell av gruverom og Rupsi-forekomsten basert på metodikken beskrevet i kapittel 5.2 er vist henholdsvis på Figur 24 og Figur 25.



Figur 24 3D-modell av gruverommene i Nordgruvefeltet sett mot sør-øst. Modifisert fra Leapfrog.



Figur 25 3D-modell av Rupsi-forekomsten sett mot nord. Hentet fra Leapfrog.

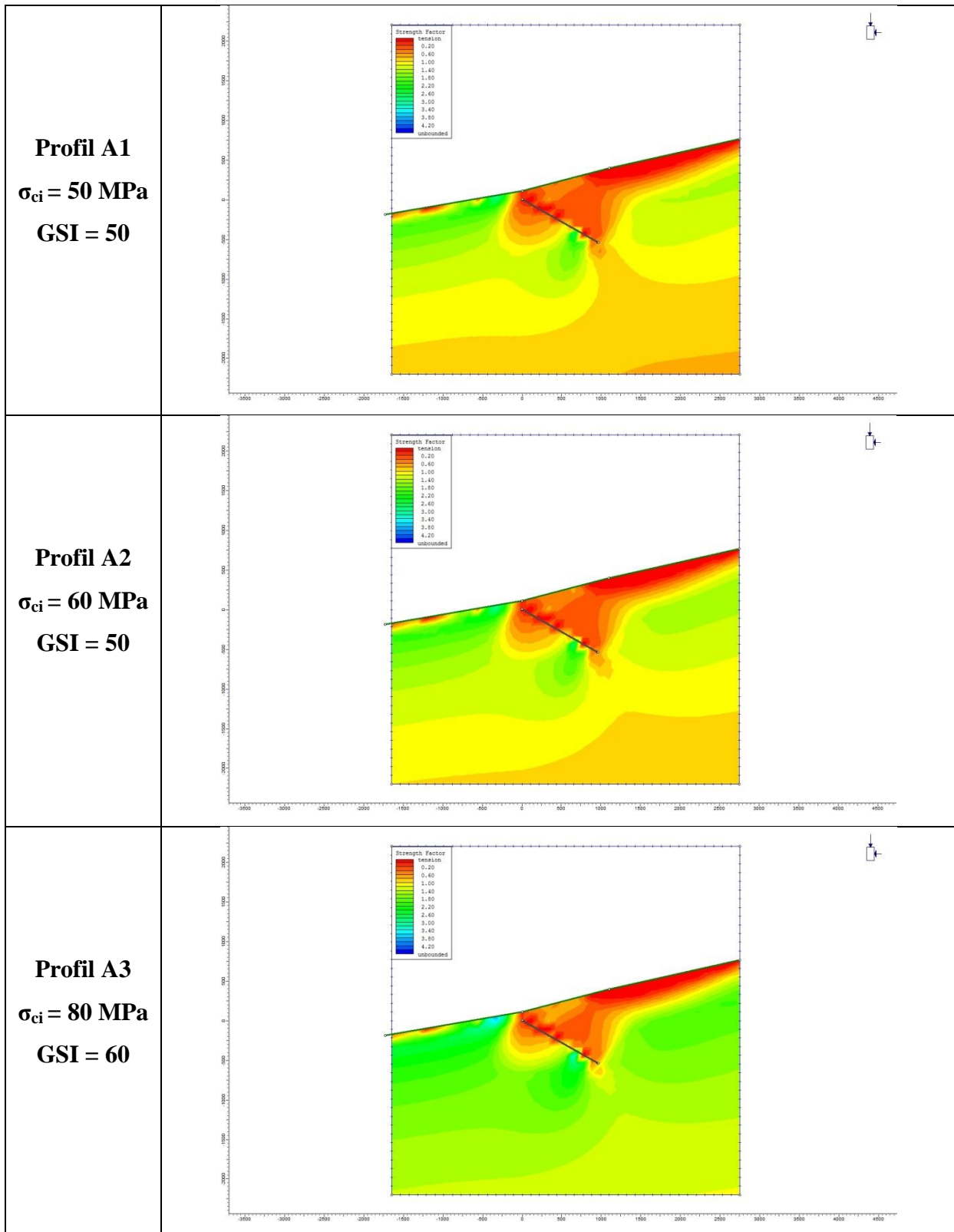
6.3 Numerisk analyse

For parameterstudiet ble det, basert på ulike verdier av enaksial trykkfasthet og GSI, i alt foretatt tre analyser av sikkerhetsfaktoren for hver av de tre profilene vist på Figur 19. Resultatene fra analysen av profilene A-A', B-B' og C-C' er vist i Tabell 7, Tabell 8 og Tabell 9. Tegningsforklaringen viser sikkerhetsfaktorer fra 0,2 (rød) til 4,2 (blå) og gul tilsvarer en sikkerhetsfaktor lik null.

Fra analysen av profil A-A' vist i Tabell 7, sees en markant bruddsone, spesielt i hengen av graven der den i alle tilfeller går helt opp til overflaten. Minste og største overdekning er på henholdsvis 108 og 900 meter. Fra ytterpunktet av nedre Giken strekker bruddsonen seg 146, 119 og 33 meter i horisontalretningen, henholdsvis i profil A1, A2 og A3. Nedre Charlotta gruve i profil B-B' har en minste og største overdekning på 700 og 900 meter, i tillegg til å ha en mindre bruddsone, se Tabell 8. Derimot er nedre del av Nedre Charlotta noe mer utsatt enn Giken gruve. I tilfellet B1 har bruddsonen største utstrekning på 215 meter i positiv vertikalretning og 21 meter i horisontalretning. I profil B2 reduseres disse til 202 meter og 17 meter og i beste tilfellet, profil B3, til 164 meter og 4,3 meter.

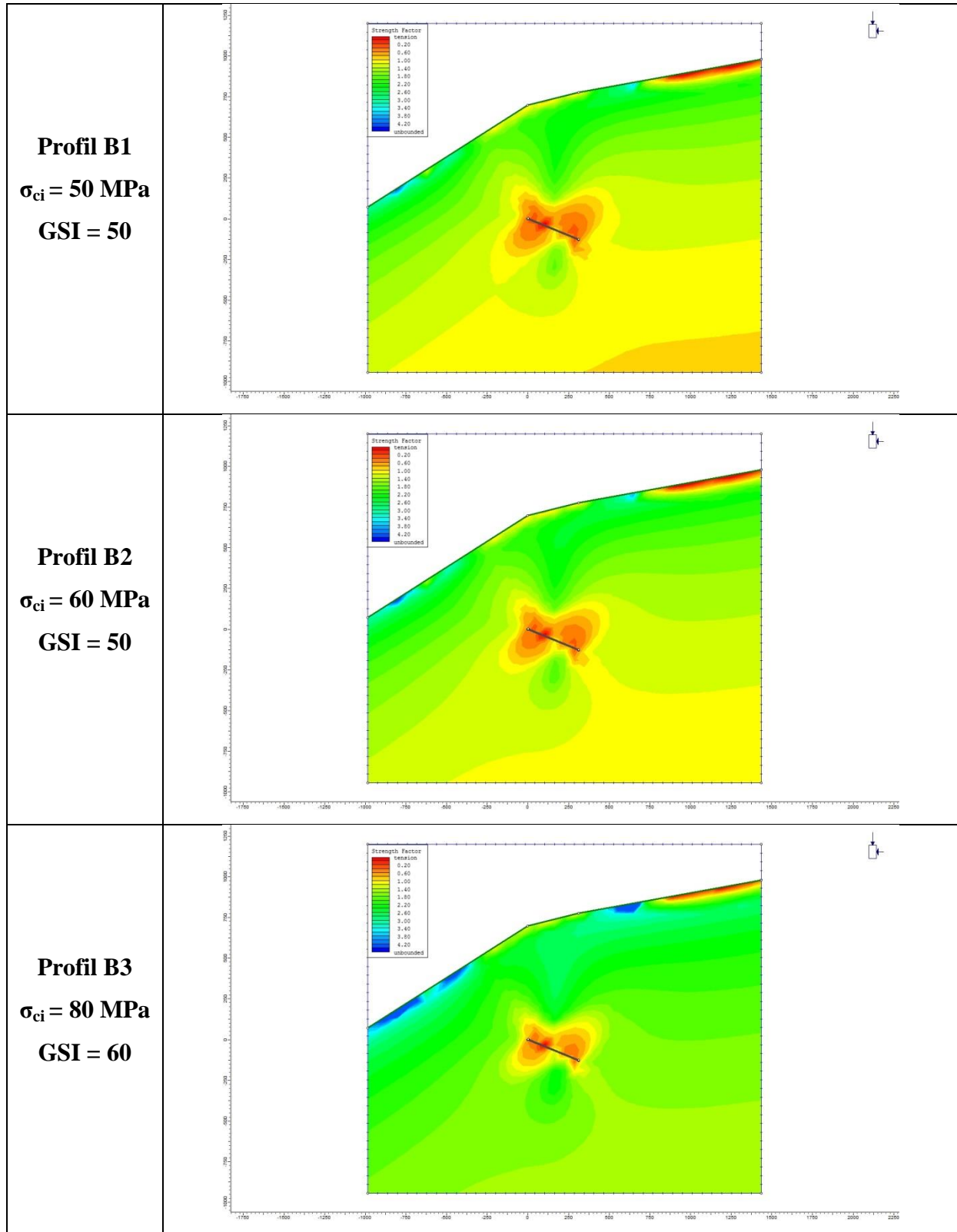
I profil C-C' vist i Tabell 9 sees adkomststollen med bredde 5 meter og høyde 7 meter. Overdekningen er på 155 meter. Her forekommer varierende grad av skjærbrudd i veggene i alle tilfeller som følge av høye spenningskonsentrasjoner. Bruddsonen har i «worst case scenario» vist i profil C1, største utstrekning på 1 meter, målt fra veggen. Dersom $\sigma_{ci} = 50$ MPa, den mest gunstige situasjonen analysert i oppgaven, reduseres bruddsonen til kun å omfatte fire små partier i øvre og nedre deler av veggene med en maksimal utstrekning på 0,2 meter.

Profil A-A'



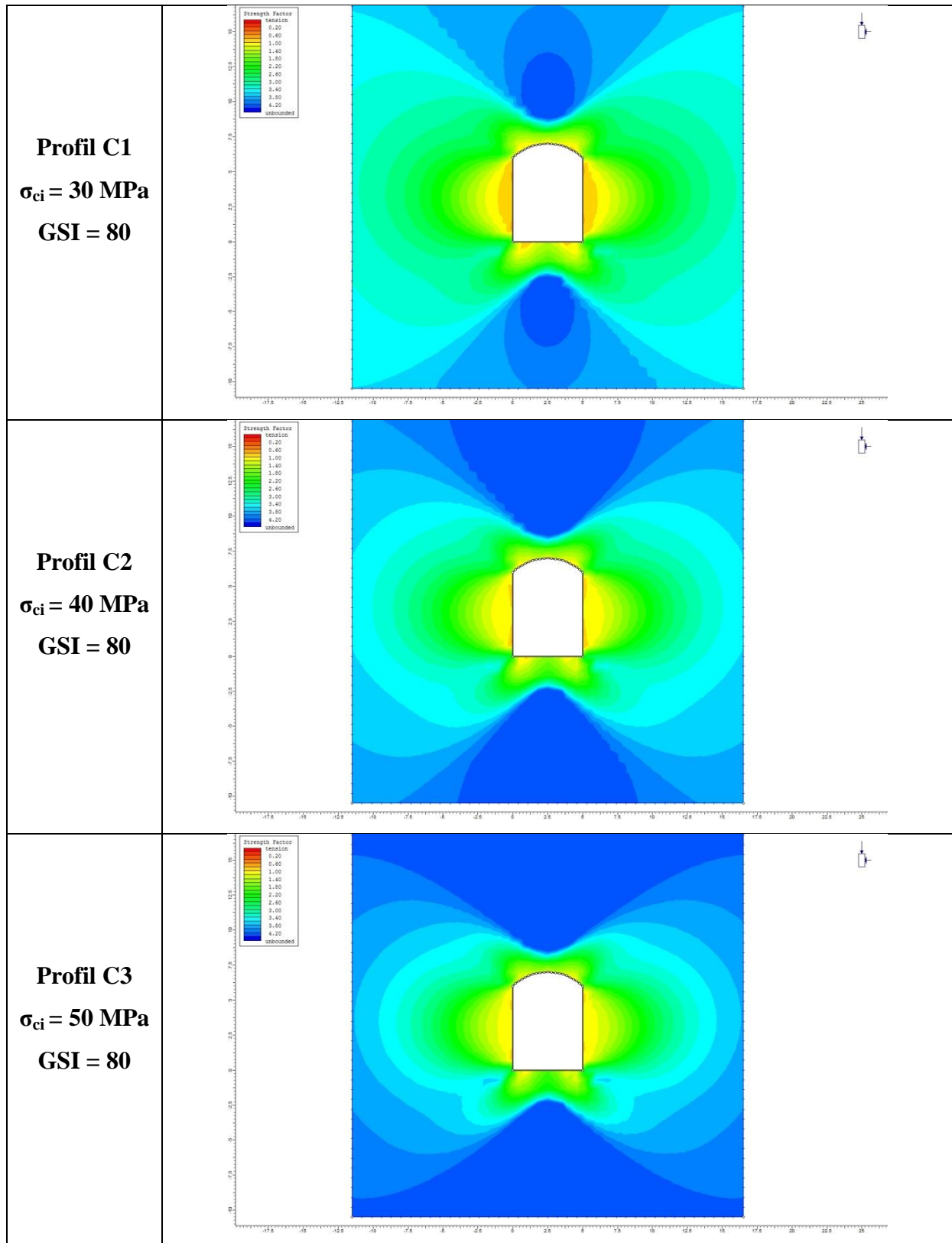
Tabell 7 Resultater fra analysen av sikkerhetsfaktoren i profil A. Hentet fra Examine2D.

Profil B-B'



Tabell 8 Resultater fra analysen av sikkerhetsfaktoren i profil B. Hentet fra Examine2D.

Profil C-C'



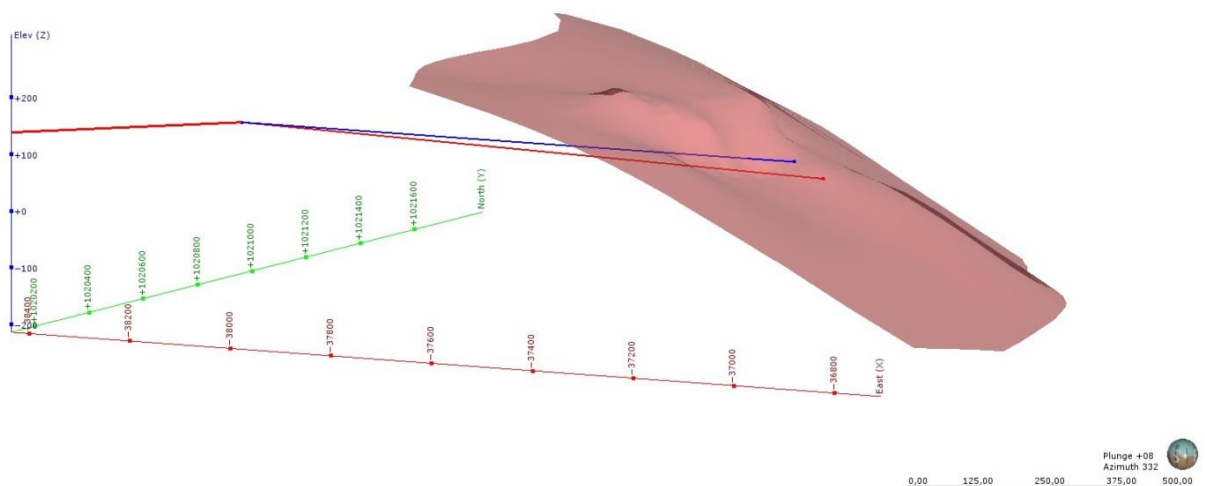
Tabell 9 Resultater fra analysen av sikkerhetsfaktoren i profil C. Hentet fra Examine2D.

6.4 Layout

Det er utarbeidet to alternative forslag til adkomstløsning for fremtidig brytning av forekomstene Rupsi, Giken og Charlotta, samt forslag til løsning for oppboring av Rupsi-forekomsten. I det følgende vil de to alternativene presenteres. Alternativ 1 med stigning 1:8 er presentert i rødt og alternativ 2 med stigning 1:10 er presentert i blått.

6.4.1 Adkomststoll

Begge alternativene har tatt utgangspunkt i å drives videre fra Rupsi-stollen, som har stigning tilnærmet null. De drives derfor inn på liggen av Rupsi-forekomsten fra sørvest og skjærer forekomsten ut på hengen, da det som oftest ikke er formålstjenlig å drive adkomst gjennom malm. Alternativ 1 og 2 ble lagt inn i Leapfrog og er vist på Figur 26 - Figur 34. Alternativ 1 skjærer den tolkede Rupsi-forekomsten etter 1048 meter og har en totallengde på ca. 1050 meter. Alternativ 2 skjærer forekomsten etter 910 meter og har en totallengde på ca. 990 meter.

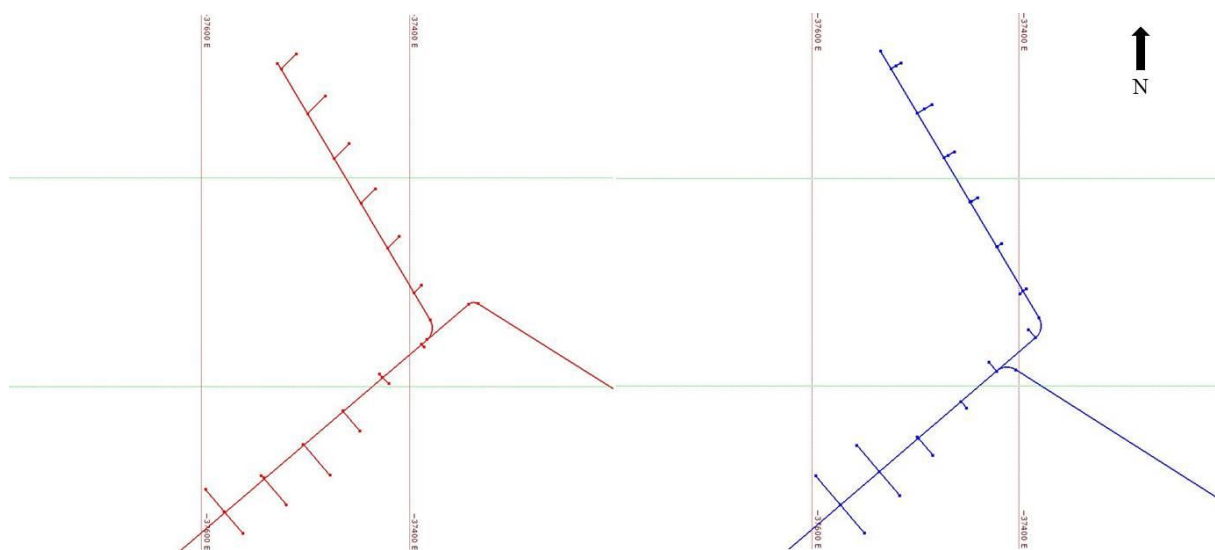


Figur 26 Alternative adkomststoller sett mot nordøst. Rupsi-stollen er vist som rød strek til venstre, tilsynelatende uten helning. Alternativ 1 og 2 er forlengelser av denne vist i henholdsvis rødt og blått. Hentet fra Leapfrog,

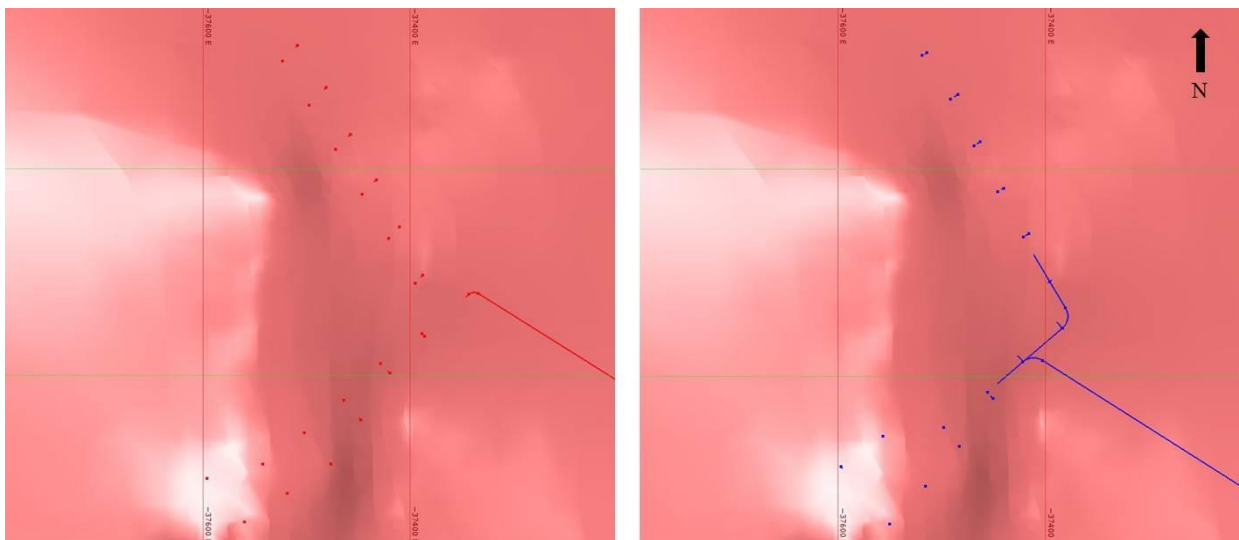
6.4.2 Undersøkelsesboring

For undersøkelsesboringen ble det lagt inn en ort mot nordvestlig retning, da det foreligger begrenset med kunnskap om forekomstens utstrekning i denne retningen (ASPRO Prospektering AS, 1986). For alternativ 1 ble adkomststollen forlenget for å oppnå skjæring med malmen, før konstruering av videre adkomst ned til Nedre Charlotta og Giken.

Det ble valgt å legge inn totalt 24 borehull, fordelt parvis fra tolv startposisjoner, med en innbyrdes avstand på 50 meter. Det ble benyttet seks borehull henholdsvis fra adkomststoll og ort, med en innbyrdes avstand på 50 meter, se Figur 27. Hensikten med dette boremønsteret er å få en oppløsning i forekomsten på 50x50 meter. Dette vil gi en tilstrekkelig definering av malmforekomsten. Som det fremgår av Figur 28 blir ikke boremønsteret symmetrisk, dette gjelder spesielt for alternativ 2. Dette kommer av adkomststollens og boreortens beliggenhet i forhold til malmflaten, og asimut og fall for borehullene er tilpasset for å få en størst mulig skjæringsvinkel med malmflaten.

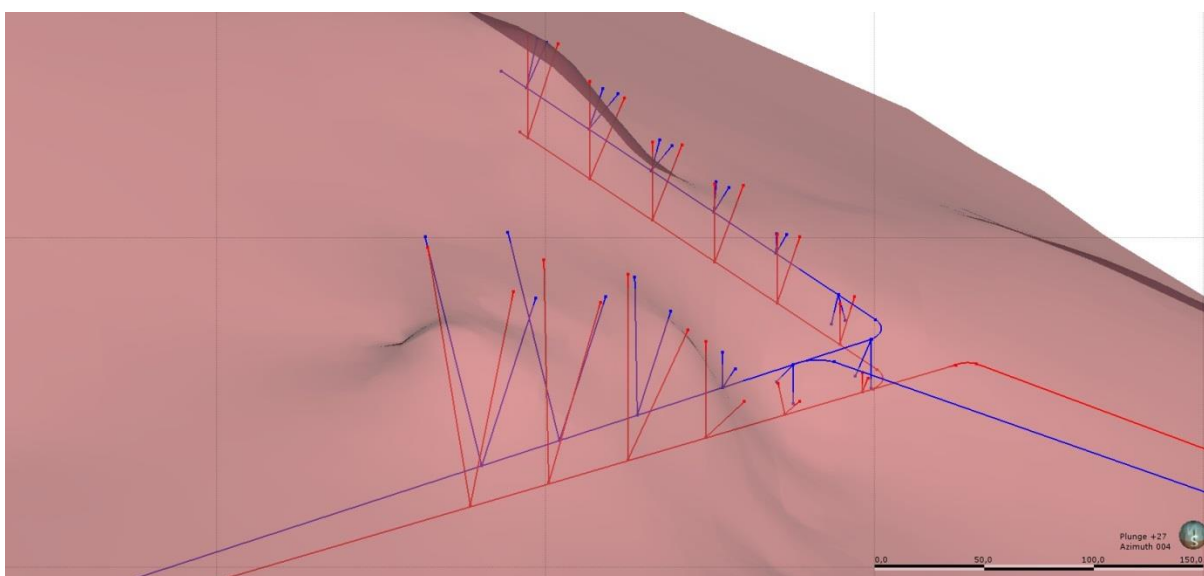


Figur 27 Forslag til undersøkelsesboring sett ovenfra. Alternativ 1 vist til venstre og alternativ 2 til høyre. Avstanden mellom borehullene er 50 meter. Modifisert fra Leapfrog.



Figur 28 Forslag til undersøkelsesboring sett ovenfra med innlagt malmflate. Modifisert fra Leapfrog.

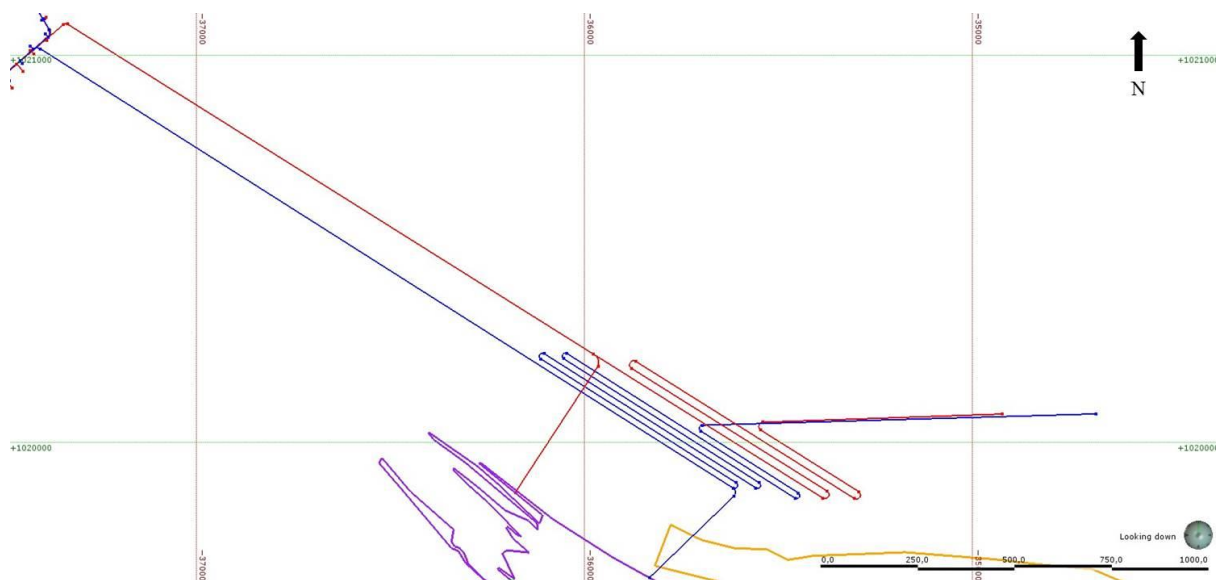
For alternativ 2, som skjærer malmen lenger opp i hengen, var det nødvendig å bore de fire ytterste borehullene fra stollen nedover for å få skjæring med malmen. Dette gjaldt også for de to første borehullene fra boreorten før den igjen skjærer malmen og drives videre inn på liggen. Dette vises på Figur 29. Det totale antall boremeter for alternativ 1 og 2 fra stoll og ort endte på henholdsvis 1241 og 855 meter.



Figur 29 Forslag til undersøkelsesboring for alternativ 1 og 2 sett mot nord. Hentet fra Leapfrog.

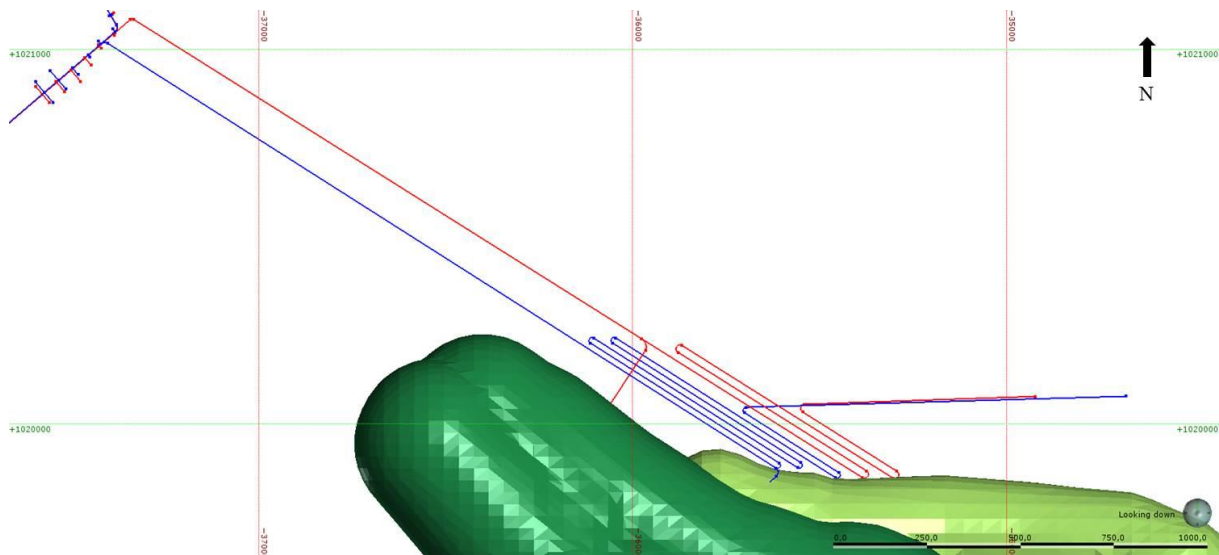
6.4.3 Rampe

Det ble valgt å legge inn den nedadgående rampen fra hengen av Rupsi-forekomsten og ned til Nedre Charlotta og forlengelsen av Giken-forekomsten. Begge ble konstruert tilnærmet vinkelrett på adkomststollen og nedover i sørøstlig retning.



Figur 30 Forslag til videre adkomst/rampe sett ovenfra. Modifisert fra Leapfrog.

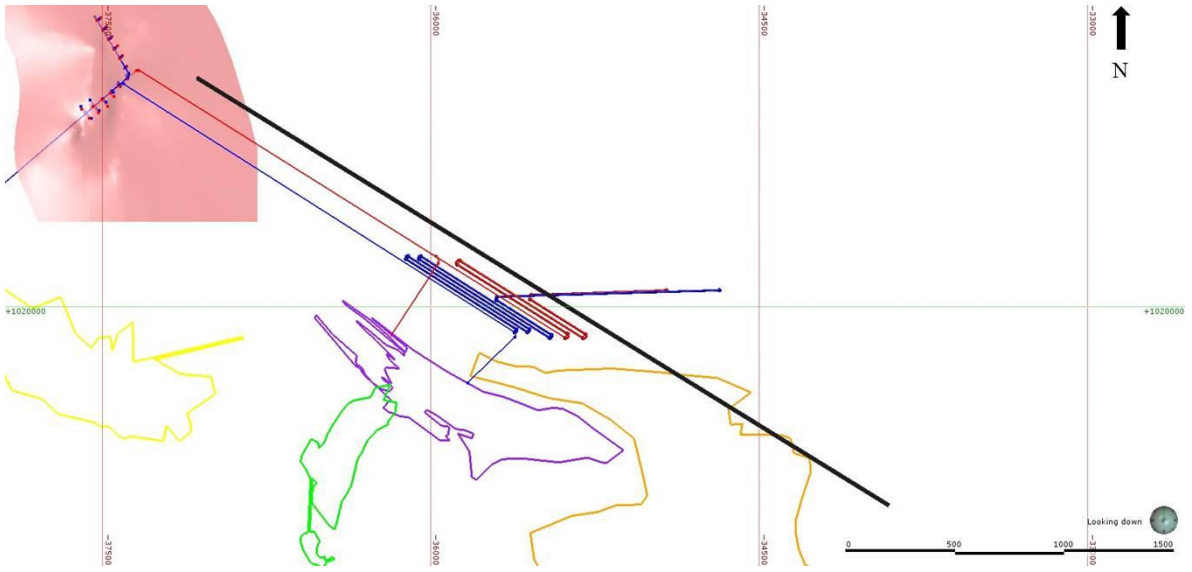
Da alternativ 1 skjærer forekomsten 138 meter senere enn alternativ 2, begynner nedstigningen på 10 moh., mot 47 moh. for alternativ 2. Det tilsvarer en høydeforskjell på omtrent 36 meter. Den numeriske analysen indikerte at bruddsonen til Giken gruve i profil A-A', beskrevet i kapittel 5.3.3, strekker seg opp til 146 meter avhengig av den enaksiale trykkfastheten og GSI-verdien. Tilsvarende for profil B-B' har bruddsonen en største utstrekning på 215 meter. Det er ved konstruering av rampen valgt å anvende verdiene fra den numeriske analysen for etablering av avstandsbufferne for å oppnå best mulig margin med tanke på stabilitet. Ved hjelp av avstandsbufferne har rampen blitt konstruert tettest mulig opp mot disse, for å unngå å havne for langt nord for målet på 677 meter under Langvannet (550 muh.). Dette vil i sin tur begrense antall unødvendige ortmeter.



Figur 31 Forslag til videre adkomst/rampe sett ovenfra med innlagte avstandsbufferne.
Modifisert fra Leapfrog.

Som det fremgår av Figur 30 ble det også lagt inn forslag for adkomst til Nedre Charlotta, da det fortsatt gjenstår malm der som kan drives ut. Adkomsten måtte legges inn på forskjellige høyder for de to alternativene for å havne på ønsket nivå. For alternativ 1 ble denne lagt inn på ca. 190 muh, mens alternativ 2 havnet på ca. 165 muh. Som vist på Figur 31 ble det imidlertid nødvendig å plassere adkomsten så langt nede i traséen at den havnet innenfor den potensielle bruddsonen for både Giken og Nedre Charlotta.

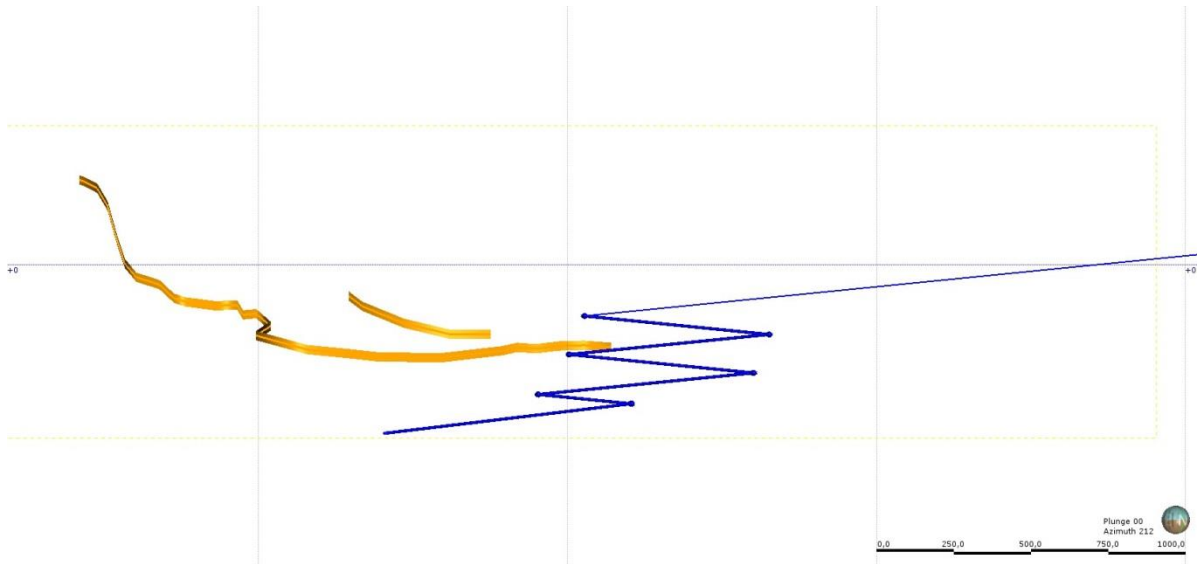
Ved å gjennomføre vertikalsnitt i Leapfrog, kan det gi et inntrykk av hvordan de ulike stigningsgradene påvirker antall ortmeter. Som det fremgår av vertikalsnittene for de to alternativene, vist i henholdsvis Figur 33 og Figur 34, krever en stigning 1:10 langt flere ortmeter for å havne på ønsket nivå. Med en rampe med lengde 6161 meter krever alternativ 1 en 1515 meter lengre rampeløsning enn det alternativ 2 gjør.



Figur 32 Plassering til vertikalsnitt for inspeksjon av rampeløsning. Modifisert fra Leapfrog.



Figur 33 Vertikalsnitt av rampen for alternativ 1, sett mot sørvest. Hentet fra Leapfrog.



Figur 34 Vertikalsnitt av rampen for alternativ 2, sett mot sørvest. Hentet fra Leapfrog.

6.5 Kostnadsberegninger

Det er gjort en kostnadsberegning på resulterende ortmeter og diamantboremeter. Drivekostnaden er stipulert med utgangspunkt i notat G3 fra Multiconsult vedrørende Tunnelkonsept og drivemetoder for Parsell 5: Holm-Nykirke datert 24.9.2007. Her fremkommer at kostnad for tverrslag, som antas å kunne være sammenlignbar med adkomststoll og orter, ligger på ca. 817 kr/m² (Multiconsult, 2007). Justert for prisstigning og andre usikkerheter, er kostnaden her satt til 1000 kr/m² hvilket gir en drivekostnad på ca. 35.000 kr/lm for et tunneltverrsnitt på 35 m². Kostnaden for diamantboremeter er satt til 1000 kr/lm (R. Hansen, 2015). Kostnadsberegningene som er gjort fremgår av Tabell 10.

Ortmeter [m]	Alternativ 1	Alternativ 2
Adkomststoll	1050	994
Boreort	308	321
Rampe	4647	6161
Adkomst Nedre Charlotta	426	328
Totale antall ortmeter	6431	7804
Drivekostnad [kr/lm] x Totale antall ortmeter [m]	225 085 000	273 140 000
Diamantboremeter [m]		
Stoll	789	660
Ort	452	195
Totale antall boremeter	1241	855
Borekostnad [kr/lm]	1 241 000	855 000
Total kostnad [kr]	<u>226 326 000</u>	<u>273 995 000</u>

Tabell 10 Kostnadsberegninger for resulterende ortmeter og boremeter.

Kostnadsberegningen tilsier at alternativ 1 med stigning 1:8 med totalt 6431 ortmeter og 1241 diamantboremeter, vil koste ca.226 millioner kroner, som gjør det til det rimeligste alternativet.

7 Diskusjon

7.1 Geologi

Innsamlede geologiske vertikallprofil fra Nordgruvefeltet tydet på at malmforekomstene i Nordgruvefeltet har et gjennomsnittlig fall på 30° og ligger hovedsakelig mellom kloritt i liggen og skifer i hengen. Det er derfor nærliggende å anta at dette vil gjelde for malmen også videre nedover i dypet. Da brytningsmetoden «Ort og pilar» tidligere er blitt brukt gjennomgående for dette fallet, er det grunn til å tro at brytningsmetoden fortsatt kan benyttes dersom gruvedriften gjenopptas. Det er som tidligere nevnt blitt rapportert om problemer knyttet til skviseberg og heving av gulvet i Giken og Nedre Charlotta under nivå 200 under Langvannet og nedover. Det bør derfor tas forbehold om at dette også kan forekomme ved fremtidig brytning.

Det meste av det geologiske materialet brukt som grunnlag for tolkning av geologien har imidlertid usikkerheter. De fleste vertikallprofilene er produsert i årene 1962-1979, da gravene fortsatt var i drift. Alle vertikallprofilene er tegnet for hånd, og det kan gi grunn til å stille spørsmål ved graden av nøyaktighet til disse og hvorvidt de representerer de virkelige forhold.

7.2 Terrenganalyse

Generelt viste terrenganalysen utført i ArcGIS et parallelt regionalt bruddmønster, hovedsakelig med strøkretning ØNØ-VSV, der majoriteten av strukturene har helning mot NNV. Dette stemmer godt overens med den strøk-/fallretningen til malmlinsene i Nordgruvefeltet. Det kan derfor være nærliggende å tro at disse sprekkene går ned i dypet med samme fall. Da det er optimalt å ha størst mulig skjæringsvinkel med markerte sprekkese, kan dette ha stabilitetsmessig betydning for rampen. Denne har som kjent fra kapittel 6.4.3 en orientering mer eller mindre parallelt med bruddmønsteret, og dette kan føre til overmasser og blokkutfall. Etter hva undertegnede erfarer er det ikke blitt rapportert om noen uheldige situasjoner knyttet til denne foliasjonen.

Vannlekkasjer kan derimot forekomme i adkomsten dersom denne plasseres ugunstig i forhold til retningen på eventuelle sprekkeretninger. Dette kan i enkelte tilfeller gjelde for sprekker parallelt større dalsider med høye spenninger (Nilsen & Broch, 2010). Det er heller

ikke for vannlekkasjer blitt rapportert om noen nevneverdige problemer under gruvedriften: Det gjaldt stort sett snøsmeltingen i mai, men det var som oftesti beskjedne mengder. Dersom gruvedriften gjenopptas, vil det være aktuelt å legge om vannstrømningsveiene for å unngå vannavrenning fra Ny-Sulitjelma, Hankabakken, Mons Petter og øvre deler av Giken. Vannet må derfor tas ut på nivåer som ligger over laveste avrenningsnivå over Langvannet (Sture, 2015). Det er ikke blitt gjort noen videre vurdering av problemer knyttet til vannlekkasjer ved fremtidig brytning.

7.3 Numerisk analyse

De numeriske analysene av profil A-A' og B-B' var nyttige indikasjoner på hvor det kan forventes lave verdier for sikkerhetsfaktor. Bruddsonen vist i profil A-A' skiller seg betydelig fra profil B-B' i den grad at den strekker seg helt opp til overflaten. Det er naturlig å anta at dette kommer av en betydelig lavere overdekning, som reduserer innspenningen til den overliggende bergmasse. For profil B-B' er spenningsforholdene bedre. Her kan det tenkes at den store overdekningen bidrar til å gjøre spenningene så store at eventuelle sprekker i bergmassen er så sammenklemt at god friksjon mellom enkeltblokker oppnås (Nilsen & Broch, 2010). Som det fremgikk av analysen av adkomststollen (profil C-C') forekom det i alle tilfeller skjærbrudd i veggene, som følge av klorittsonen og generelt lavere bergartstyrker. For å oppnå en tilstrekkelig sikkerhetsfaktor og unngå eventuelle brudd, anbefales det å sikre med stålfiberarmert sprøytebetong og minst 2,4 meter lange endeforankrede bolter i veggene (Li, 2015).

Den største usikkerheten knyttet til den numeriske analysen er inngangsparameterne. In-situ verdier er basert på én enkelt spenningsmåling fra 1983, mens resten av inngangsparameterne er basert på generelle klassifiseringsskjemaer og empiriske erfaringer. Gitt vanskelighetsgraden av å estimere pålitelige, numeriske verdier for bergmasseegenskaper kan en ikke ved bruk av numerisk analyse forvente unike og pålitelige resultater. I tillegg er modellene som har vært gjenstand for den numeriske analysen forenklete versjoner av virkeligheten. Nedre Charlotta og Giken består egentlig av flere mindre gruver på forskjellige nivåer. For enkelthetens skyld er disse blitt modellert som sammenhengende åpne rom. Det kan også nevnes at overdekningen i profil C-C' er antatt å være kontinuerlig bergmasse. I

realiteten ligger Rupsi-stollen 25 meter under Bursi gruve, og en forlengelse av Rupsi-stollen kan i realiteten bli stabilitetsmessig påvirket av denne.

Generelt kan man si at numerisk analyse er et nyttig, men likevel begrenset verktøy, og i likhet med alle numeriske modeller, bør den brukes kun til forbedring og som et supplement til sunn fornuft og god ingeniørfaglig dømmekraft.

7.4 3D-modellering

3D-modellen viste god overensstemmelse med de geologiske funn gjort i litteraturen. Som det fremgår av Figur 24 ligger Mons Petter gruve en del høyere opp i lagpakken, og den minste avstanden mellom Mons Petter og Charlotta er på ca. 200 meter. I likhet med Bursi gruve ligger den i en fold og har ikke den strøk/fall-retningen som er det normale for gruverommene Giken, Charlotta, Hankabakken og Ny-Sulitjelma. Dette stemmer godt overens med de stratigrafiske vertikallprofilene laget av Tor Søyland Hansen (1983) lagt ved i Vedlegg 11-Vedlegg 14.

Prosessen for 3D-modelleringen har riktignok noen svakheter. Det viste seg at gruvekartene benyttet til 3D-modelleringen lagt ved i Vedlegg 1-Vedlegg 4 ikke er riktig skalert, og som derfor har påvirket nøyaktigheten til modellen. I likhet med den numeriske analysen, ble samtlige gruverom i Nordgruvefeltet modellert som sammenhengende åpne rom. I tillegg ble opprettelsen av «omrissene» rundt gruvene gjennomført med begrenset nøyaktighet i den grad at modellen ikke nødvendigvis gjenspeiler virkeligheten.

Et annet usikkerhetsmoment kan knyttes til arbeidet med å registrere overdekningen til gruverommene i profilene B-B' og C-C' benyttet i numeriske modellen. Dette ble gjort ved hjelp av en enkel oppmålingsfunksjon tilgjengelig i Leapfrog. Som et alternativ her kunne en nok ha eksportert en blokkmodell med innlagte distanser til excel for beregning av vertikalspenninger, for en mer nøyaktig numerisk analyse.

7.5 Layout

For begge alternativene ble det valgt et boremønster på 50x50 meter, fra både adkomststoll og boreort. Med dette som utgangspunkt vil en nærmest garantert kunne definere en målt ressurs. Sannsynligvis vil 100x100 meter være tilstrekkelig for dette formålet, men det vil også være avhengig av forekomstens kontinuitet, dvs. fordelingen av verdifulle elementer (Ellefmo, 2015). Undersøkelsesboring kan gjøres på mange måter, og flere hundre borehull er ikke uvanlig på større forekomster. Det bør leies inn personale med riktig kompetanse om diamantboring som kan gi anbefalinger for en optimal gjennomføring av boringen for en tilstrekkelig definering av forekomsten.

Alternativet med den slakeste stigningen, her representert av alternativ 2, trenger færre antall boremeter da denne oppnår en tidligere skjæring med Rupsi-forekomsten. Analysene gjort i Leapfrog viser imidlertid at det resulterer i en lengre rampe da denne for det første starter lengre opp enn alternativ 2, nærmere bestemt 36 meter høyere opp, og for det andre krever flere ortmeter for å komme ned til ønsket nivå. Alternativ 1 gir en raskere adkomst til Nedre Charlotta og til forlengelsen av Giken-forekomsten. Det kreves derimot flere boremeter for dette alternativet. Jo lengre de to alternativene beveger seg innover i det som antas å være liggen av Rupsi-forekomsten, jo mer øker avstanden mellom adkomststoll 1 og forekomsten med en høyere koeffisient enn det adkomststoll 2 gjør. Nærmere bestemt, for hver tiende meter synker alternativ 1 med 1,25 meter, der alternativ 2 synker med 1 meter. Derfor trengs det lengre boremeter for alternativ 1 for å nå opp til forekomsten.

Begge alternativene har generelt en stigning nedover fra stollåpningen. Dette kan by på utfordringer i forbindelse med vanddrenering nedover stoll og rampe, og dersom en av disse adkomstløsningene blir valgt må det etableres et system for håndtering av dette.

At det i oppgaven ble valgt å operere med stigningsgrader 1:8 og 1:10 er nødvendigvis ikke den mest fornuftige tilnærmingen. Det foreligger flere usikkerheter for beregningen av maksimal stigningsgrad, og de antakelsene som er gjort vil ikke nødvendigvis sammenfalle med de virkelige vegtekniske forholdene for en fremtidig adkomst. Det anbefales derfor å gjennomføre en grundigere beregning for den maksimale, teoretiske stigningsgraden basert på verdier innhentet fra eksisterende veger i nordgruvefeltet.

For adkomst for Nedre Charlotta havner alternativ 2 innenfor bruddsonen til både Giken og Nedre Charlotta. Dette kan gi uheldige konsekvenser med tanke på stabilitet for denne adkomsten. Det kan derfor være fornuftig å finne en løsning som unngår skjæring med begge bruddsonene. Dette vil imidlertid avhenge av hvor i Nedre Charlotta en ønsker å gjenoppta gruvedriften. Det er det i oppgaven ikke blitt gjort noen vurdering på.

I tillegg er det gått ut ifra «worst case scenario» fra resultatene av de numeriske analysene av spenningssituasjonen rundt de nedre deler av Giken og Charlotta er nødvendigvis ikke den riktige tilnærmingen. Spenningssituasjonen kan i virkelighetene være betydelig bedre. Det vil gjøre det mulig å legge rampen enda nærmere gruverommene, som igjen kan redusere antall ortmeter. Det anbefales derfor å innhente og analysere representative prøver av ulike bergartsmaterialer hentet fra nedre deler av Giken og Charlotta, samt gjennomføre nye spenningsmålinger.

Hvorvidt Leapfrog egner seg til å planlegge infrastruktur for gruvedrift er diskutabelt. Da det i oppgaven er blitt fokusert på stabilitetsmessige påvirkninger fra tidligere gruverom, stigningsgrad og kurveradius har Leapfrog vist seg som et nyttig verktøy for layout da den innehar funksjoner som kan ta høyde for disse parameterne. Dersom planlegging av infrastruktur skal utvides til å omfatte andre veggdimensjonerende faktorer som vegbredde, tverrsnitt eller eventuelt ta høyde for ingeniørgeologiske forhold som vannforhold, sprekker osv. er programvaren relativt begrenset. Da bør det benyttes andre programvarer som kan ta høyde for disse faktorene, som f.eks. autoCAD, Microstation osv.

7.6 Kostnadsberegninger

Kostnadsberegningene viste, med de forutsetningene som ble gjort, at alternativ 1 pekte seg ut som det billigste alternativet basert på drivekostnader og borekostnader. Dette kom hovedsakelig av et lavere antall ortmeter for alternativ 1 enn for alternativ 2. Kostnadene er basert på grove antakelser fra en enkelt rapport, og det anbefales derfor å gjøre en mer omfattende studie for kostnader knyttet til driving og gjennomføring av undersøkelsesboring.

Kostnadsberegningene utført i denne oppgaven vil likevel kunne gi en indikasjon på hvorvidt en bør avveie valg av adkomstløsning i forhold til antall boremeter for undersøkelsesboring

og total lengde på adkomstløsningen. Det kan derfor være fornuftig å redusere antall ortmeter ved å bruke en brattere stigning. En stigning 1:8 vil imidlertid by på større krav i forhold til veggrep, og ekstra kostnader knyttet til begrenset lastekapasitet og økt dieselforbruk.

8 Konklusjon

Hovedfunnene i oppgaven er listet opp i følgende punkter:

- ➔ På bakgrunn av geologiske vertikalprofil tyder det på at forekomsten i Nordgruvefeltet fortsetter med samme fall med kloritt i liggen og skifer i hengen. Fremtidig brytning på bunnen av Nedre Charlotta og forlengelsen av Giken-forekomsten kan derfor gi problemer med skviseberg og heving av gulvet.
- ➔ Terrenganalysen indikerer et bruddmønster med strøkretning ØNØ-VSV. Disse sprekkene kan medføre stabilitetsproblemer for nedadgående rampe med tanke på ugunstig orientering i form av overmasser og blokkutfall.
- ➔ Numerisk analyse viste at potensielle bruddsoner fra gruverommene Giken og Nedre Charlotta fikk utstrekninger opp mot henholdsvis 146 og 215 meter. Traséen bør av stabilitetsmessige årsaker legges utenom disse bruddsonene. Den numeriske analysen viste også at det forekom skjærbrudd i veggene av adkomststollen grunnet klorittsonen. Dette bør sikres ved å kombinere fiberarmert sprøytbetong med minimum 2,4 meter lange bolter i veggene.
- ➔ Skjematisk layout av to alternative adkomstløsninger, 1 og 2 med stigning henholdsvis 1:8 (12,5 %) og 1:10 (10 %) ble konstruert i Leapfrog og plassert i tilstrekkelig sikker avstand fra gruvene Nedre Charlotta og Giken med tanke på bruddsonene. Alternativ 1 og 2 fikk resulterende ortmeter på henholdsvis 6431 og 7804 og boremeter på 1241 og 855.
- ➔ En grov kostnadsberegning basert på drivekostnader og kostnader for diamantkjerneboring, tilsier at alternativ 1 vil koste ca. 226 millioner kroner, mens alternativ 2 vil koste ca. 274 millioner kroner. Alternativ 1 utpeker seg derfor som den rimeligste adkomstløsningen.

9 Videre arbeid

Gruvedrift i Sulitjelma er fortsatt en fremtidsvisjon, og det er flere faktorer som må klargjøres før det er realistisk å starte opp åpningsarbeidene for adkomst for fremtidig brytning og videre oppboring av Rupsi-forekomsten. I den sammenheng er det fra erfaringer gjort under arbeid av oppgaven anbefalt å gjøre følgende:

- Utrede ulike brytningssystemer, hvilke infrastruktur som skal benyttes (bånd- eller hjultransport) osv. Dette er av avgjørende betydning for valg av adkomstløsning.
- Foreta geofysiske målinger for å undersøke hvorvidt overflatesprekkene går ned mot dypet. I tillegg bør det gjennomføres feltarbeid for å undersøke sprekketetthet, utholdenhet, sprekkeplanenes beskaffenhet osv.
- Gjennomføre en grundig undersøkelse av ingeniørgeologiske forhold på bunnen av Giken og Nedre Charlotta, samt i enden av Rupsi-stollen for en mer nøyaktig numerisk analyse. Dette bør innebære innhenting og analysering av representative prøver fra ulike bergartsmaterialer og gjennomføring av nye spenningsmålinger.
- Gjennomføre en ren overflatebasert kartlegging med spesialundersøkelser som boringer, driving av prøvestoller og sjakter, geofysiske målinger, samt vanntapsmålinger for få frem et godt nok bilde av de ingeniørgeologiske forhold.
- Foreta ytterligere undersøkelser av Rupsi-forekomsten i form av borehullsgeofysikk og flere diamantkjerneboringer for en fullstendig geologisk modell av forekomsten, samt mer detaljert informasjon om mineralinnhold.
- Utrede systemer for håndtering av vann som eventuelt måtte slippe til fra gamle gruverom, for å unngå problemer med vannlekkasjer under driving av adkomst og nye brytningsrom.
- Gjennomføre en dyptgående studie for ett mer realistisk kostnadsestimat for driving av adkomst og gjennomføring av diamantkjerneboring.

10 Referanser

- ASPRO Prospektering AS. (1986). Vurdering af strukturelle forhold: ASPRO Prospektering AS.
- Bentley Systems. (2015). Aeco information modeling and cad production software. fra <http://www.bentley.com/en-US/Products/microstation+product+line/>
- Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2004). *Rock mechanics for underground mining*. Dordrecht: Kluwer.
- Bruland, A. (2015). [Mailkorrespondanse angående kjøremekanikk og drivekostnader i tunnel.]
- Bullock, R. L. (2001). General planning of the noncoal undergorund mine. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*, 14.
- Constantia Resources Ltd. Drilling. Hentet fra: http://www.constantiaresources.com/i/pdf/CST_FS_Drilling.pdf
- Cook, N. J., Halls, C., & Kaspersen, P. O. (1990). The geology of the sulitjelma ore field, northern norway; some new interpretations. *Economic Geology*, 85, 17.
- Direktoratet for Mineralforvaltning. (1978). Nordgrubekomiteén; sammendrag og konklusjoner.
- Ellefmo, S. (2015). [Muntlig kommunikasjon.]
- Godager, B. (2006). *Utfordringer med euref*. file:///C:/Users/TEMP.WIN-NTNU-NO.042/Downloads/20060505_veidekke_EUREF%20(2).pdf
- Hansen, R. (2015). Mailkorrespondanse angående diamantboring på rupsi-forekomsten.
- Hansen, T. S. (1983). *En geologisk undersøkelse av nordgruvefeltet i sulitjelma* (Vol. [304]). Trondheim: NTH.

- Haugen, S. (2014). *Forelesningsfoil i tgb4227: Innledning og valg av brytningsmetode*. Forelesningsnotater hentet fra
- Hoek, E. (2001). Rock mass properties for underground mines. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34(8), 1165-1186. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)80069-X](http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X)
- Li, C. (2015). [Muntlig kommunikasjon.]
- Marinos, V., Marinos, P., & Hoek, E. (2005). The geological strength index: Applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(1), 55-65.
- Marjoribanks, R. W. (1997). *Geological methods in mineral exploration and mining*. London: Chapman & Hall.
- Multiconsult. (2007). *Parsell 5: Holm-holmestrand-nykirke*. Hentet fra: http://www.jernbaneverket.no/contentassets/9a7342655ee74b5aac942f760eca899f/_10_notat_g3_tunn_1822344a.pdf
- Myrvang, A. (1983). Rapport vedrørende bergtrykksmålinger i sulitjelma 1983. Trondheim.
- Myrvang, A. M. (2001). *Bergmekanikk*. Trondheim: Institutt for geologi og bergteknikk, NTNU.
- Nilsen, B., & Broch, E. (2010). *Ingeniørgeologi - berg: Grunnkurskompendium*. Trondheim: Tapir akademisk forlag, Kompendieforlaget.
- Nilsen, B., & Palmstrøm, A. (2000). *Handbook no 2: Engineering geology and rock engineering*. Oslo: Norsk Bergmekanikkgruppe.
- NSG. (2013). Ny drift i sulitjelma gruver.
- NSG. (2015). *Status og fremdrift i sulis*.
- Olsen, V. (2009). *Rock quarrying, quarry design*. Philosophiae Doctor, Norwegian University of Science and Technology Trondheim.

Ramlo, E. (2014). Identifying faults at the Mohns and Knipovich ridges *Project report*: NTNU.

Rocscience. Quick start tutorial. 2015, fra https://www.rocscience.com/help/examine2d/webhelp/pdf_files/tutorials/Tutorial_01_Quick_Start.pdf

Statens Vegvesen. (2013). Veg- og gateutforming Vol. 017. *håndbok 017*.

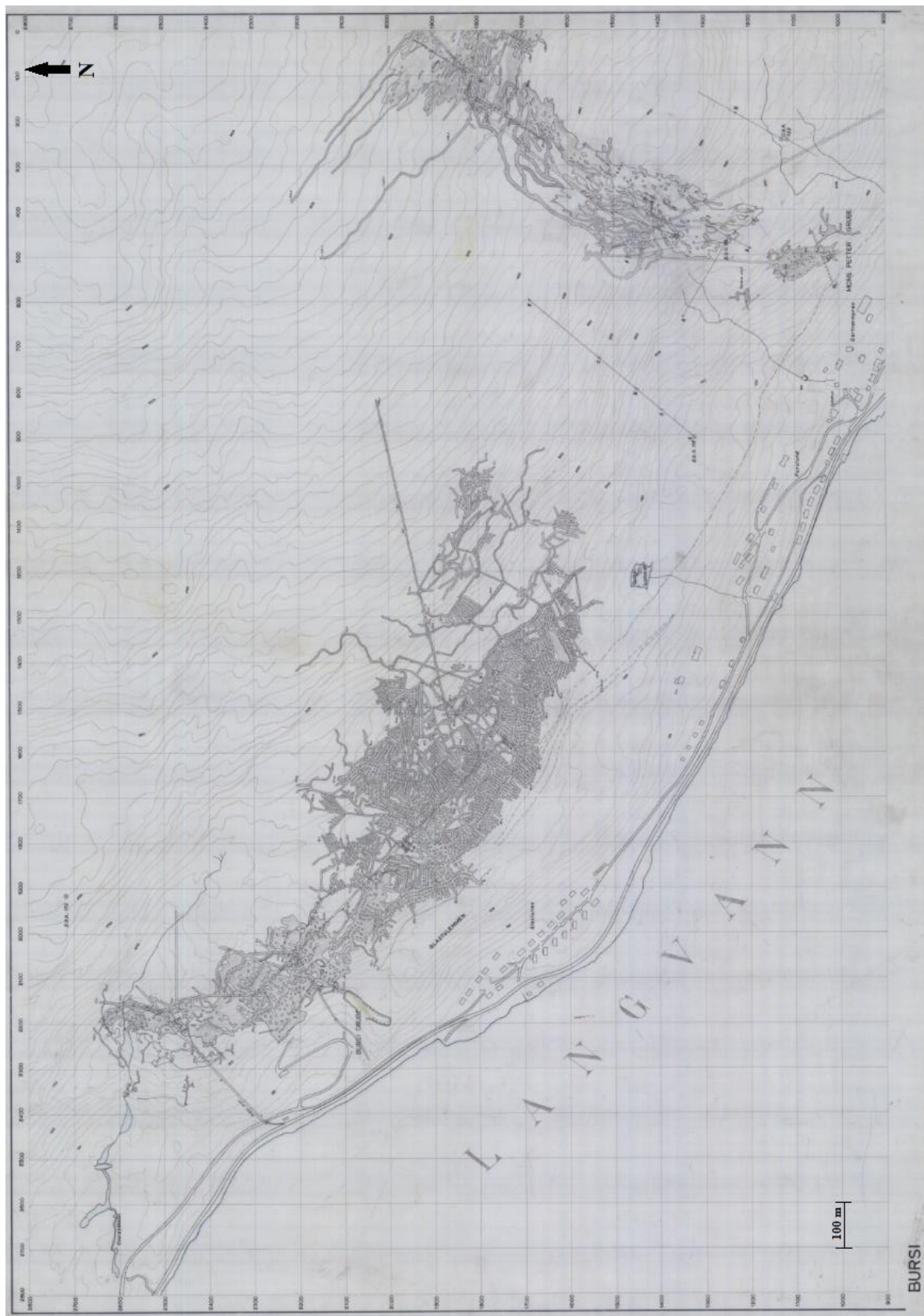
Stille, H. (2001). Rock support in theory and practice. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*, 12.

Sture, K. (2015). [Mailkorrespondanse angående erfaringer fra Sulitjelma.]

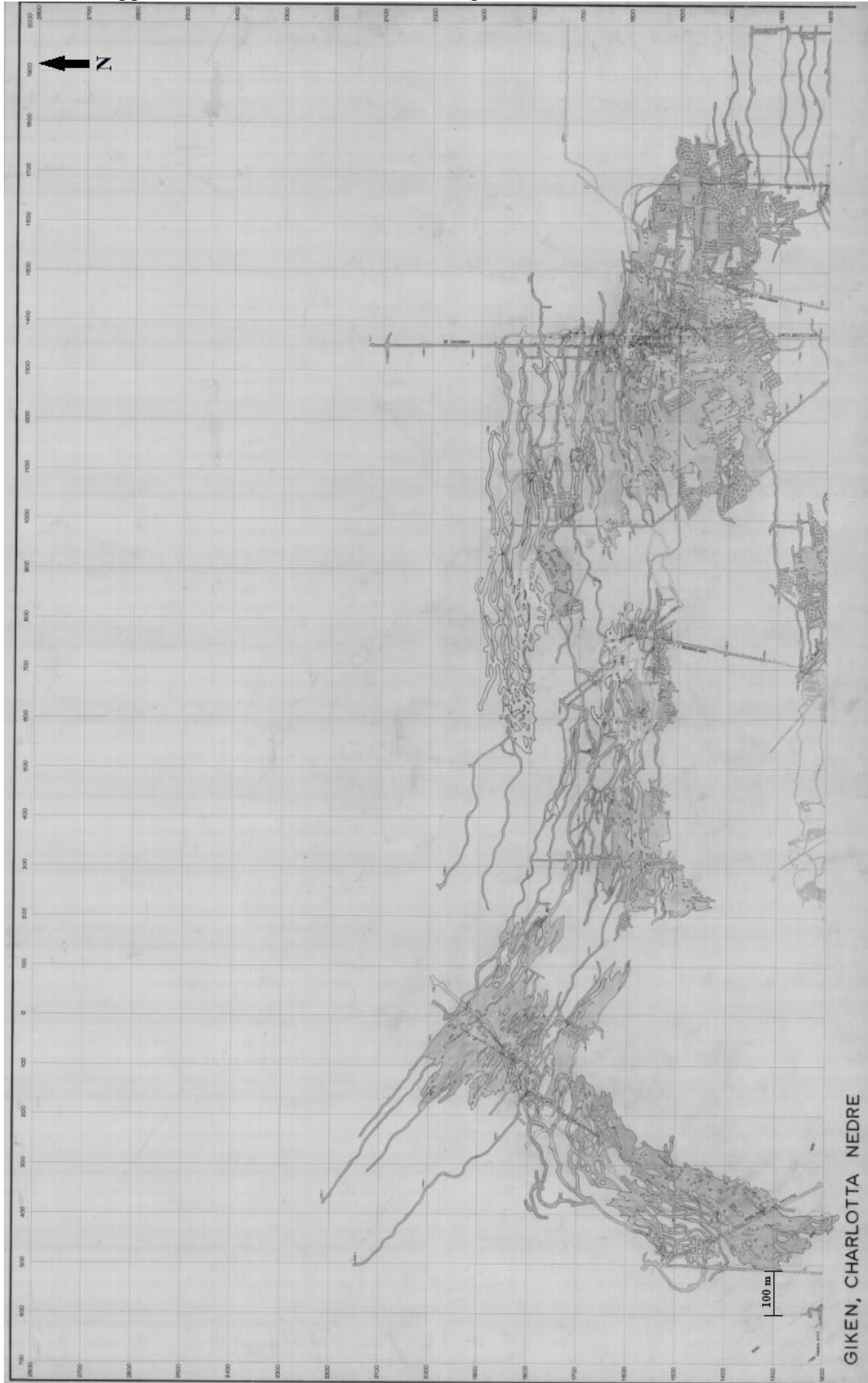
Zare, S. (2007). Prediction model and simulation tool for time and cost of drill and blast tunnelling : Drill and blast tunnelling : Costs. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering.

11 Vedlegg

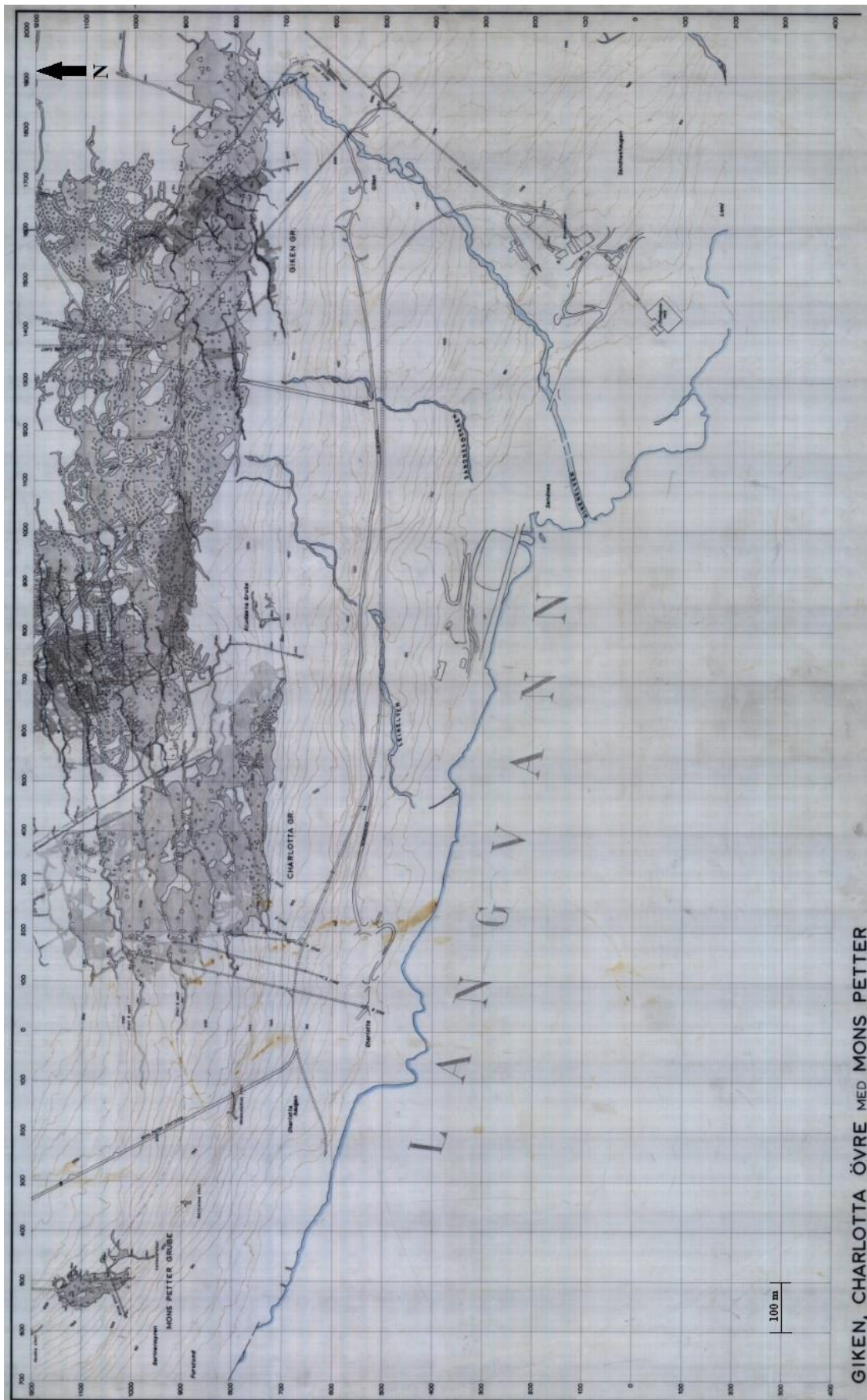
Vedlegg 1 Gruvekart nr.1: Bursi gruve. Modifisert fra DirMin.



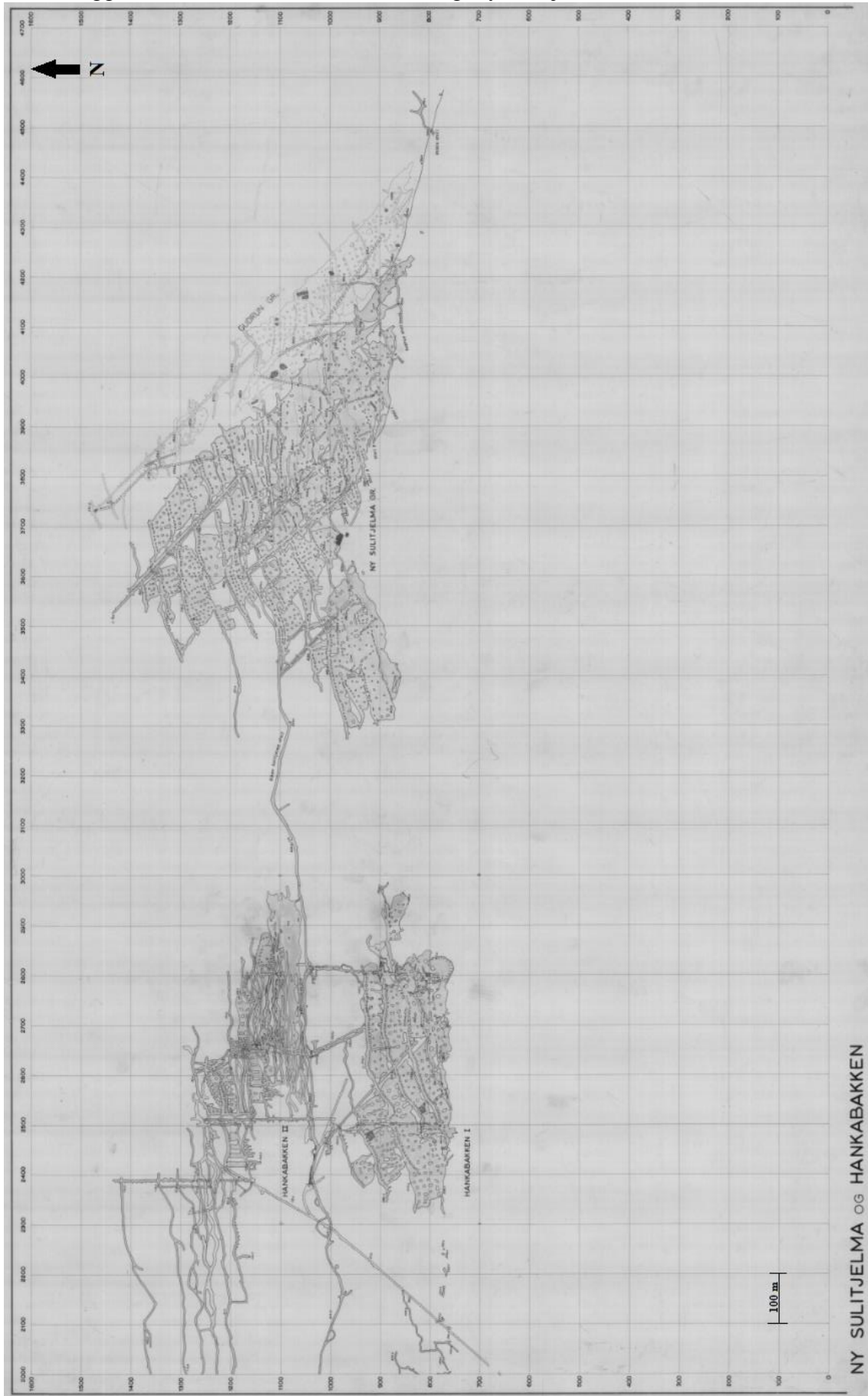
Vedlegg 2 Gruvekart nr.2: Nedre Giken og Charlotta. Modifisert fra DirMin.



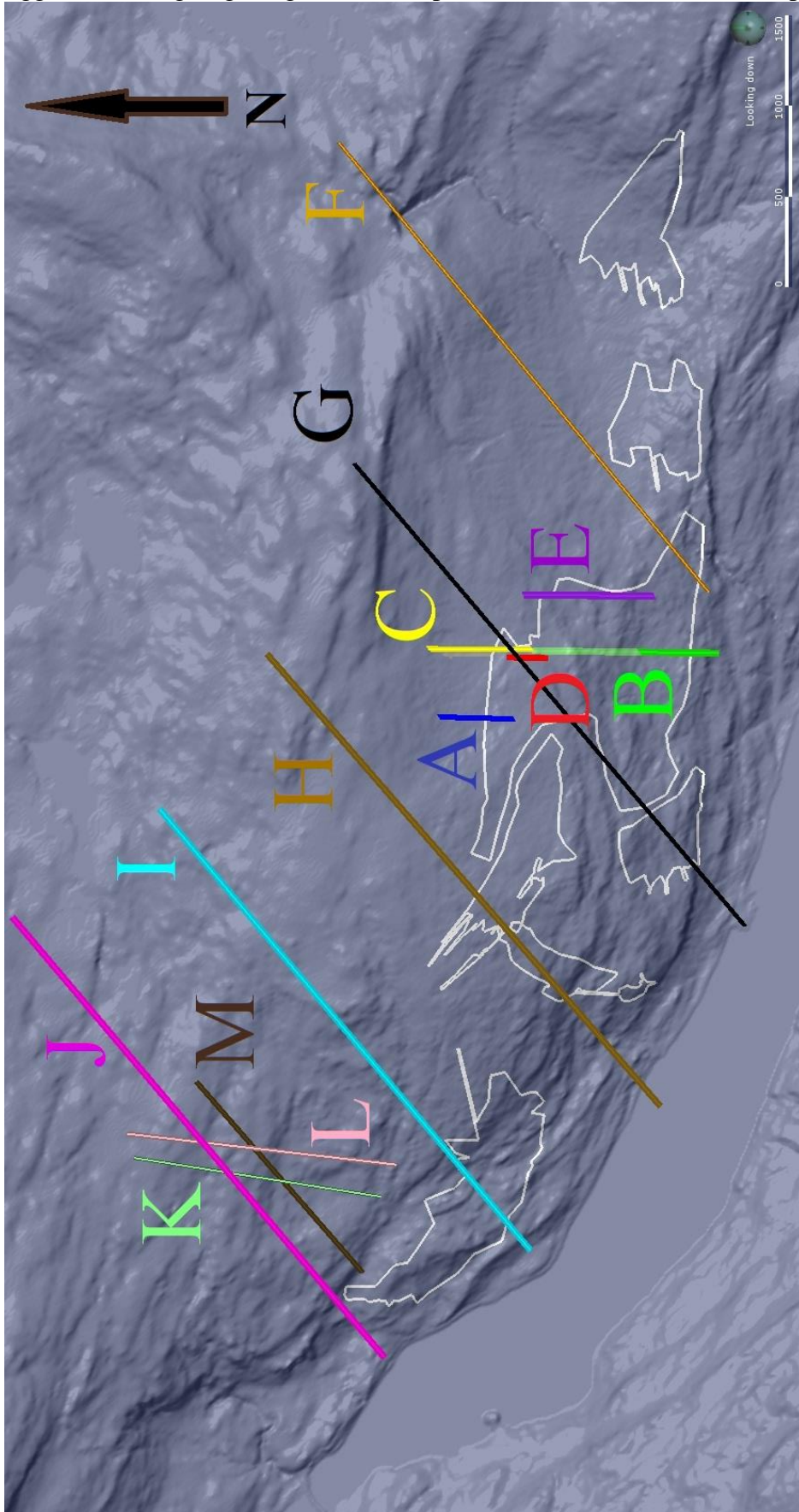
Vedlegg 3 Gruvekart nr.3: Øvre Giken og Charlotta. Modifisert fra DirMin.



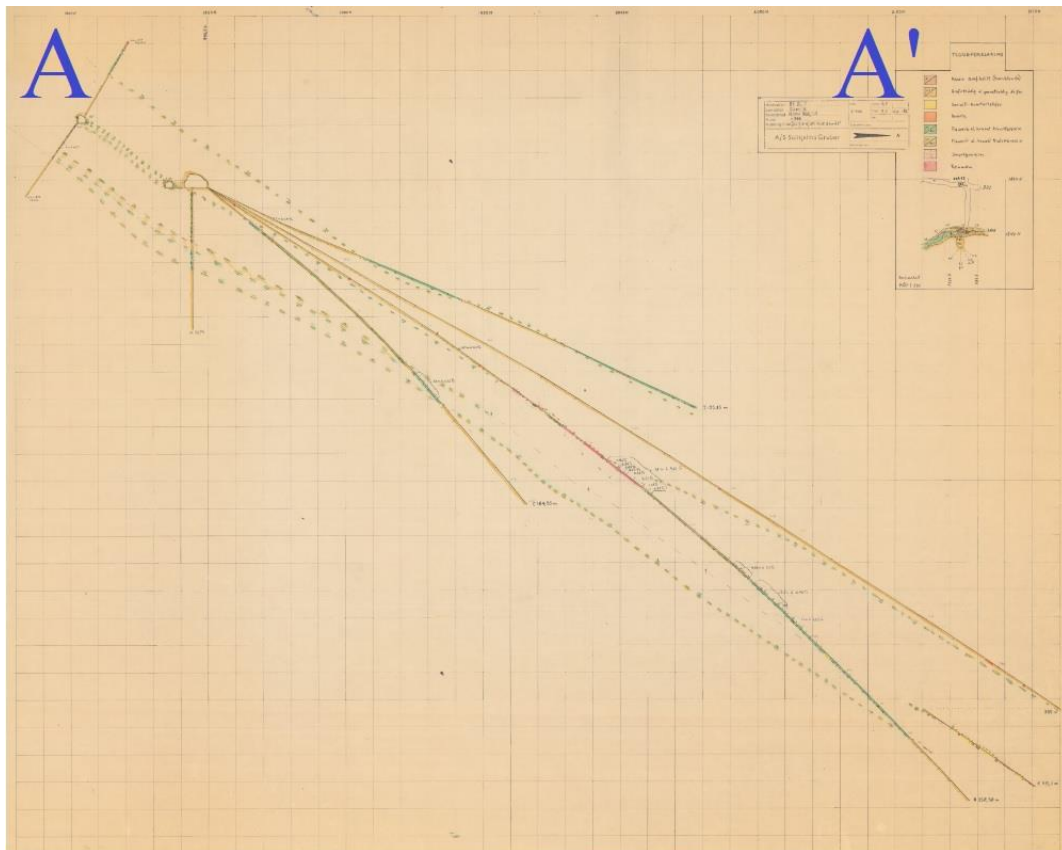
Vedlegg 4 Gruvekart nr.4: Hankabakken og Ny Sulitjelma. Modifisert fra DirMin.



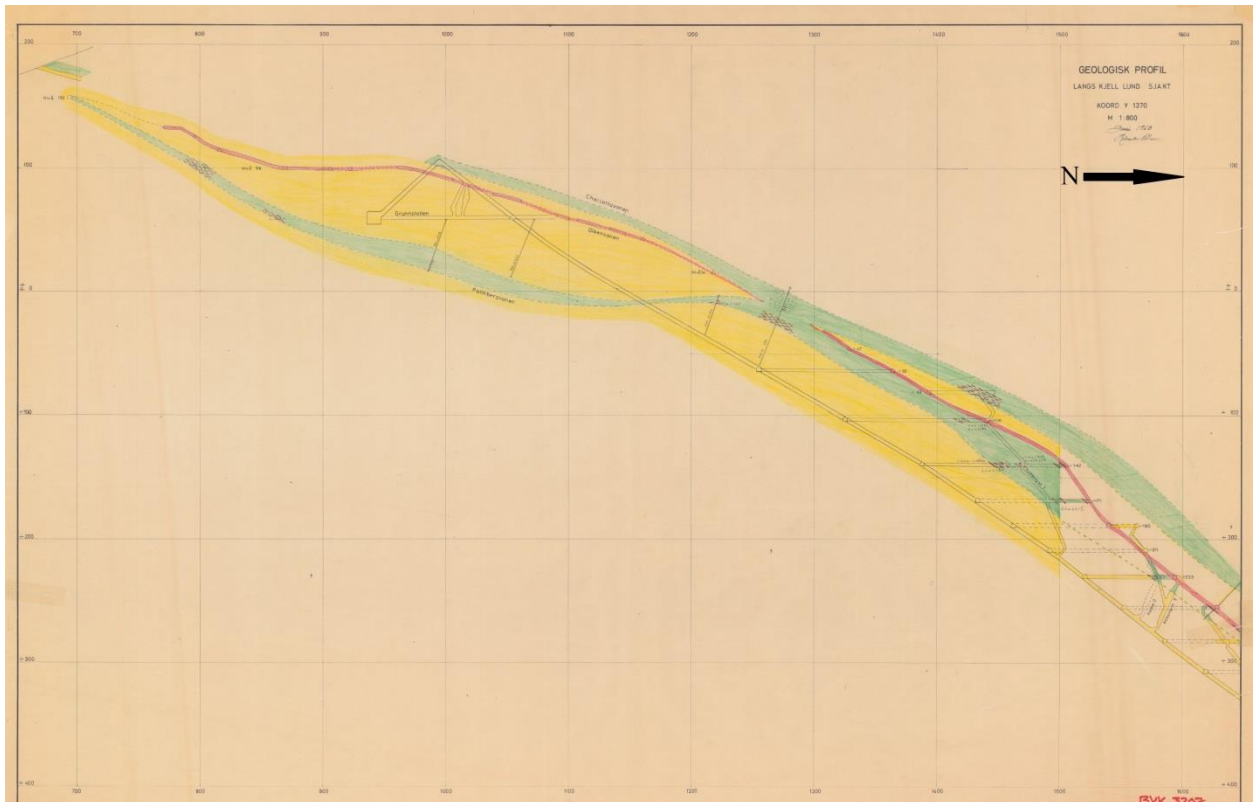
Vedlegg 5 Plassering til geologiske vertikallprofiler A-M. Modifisert fra Leapfrog.



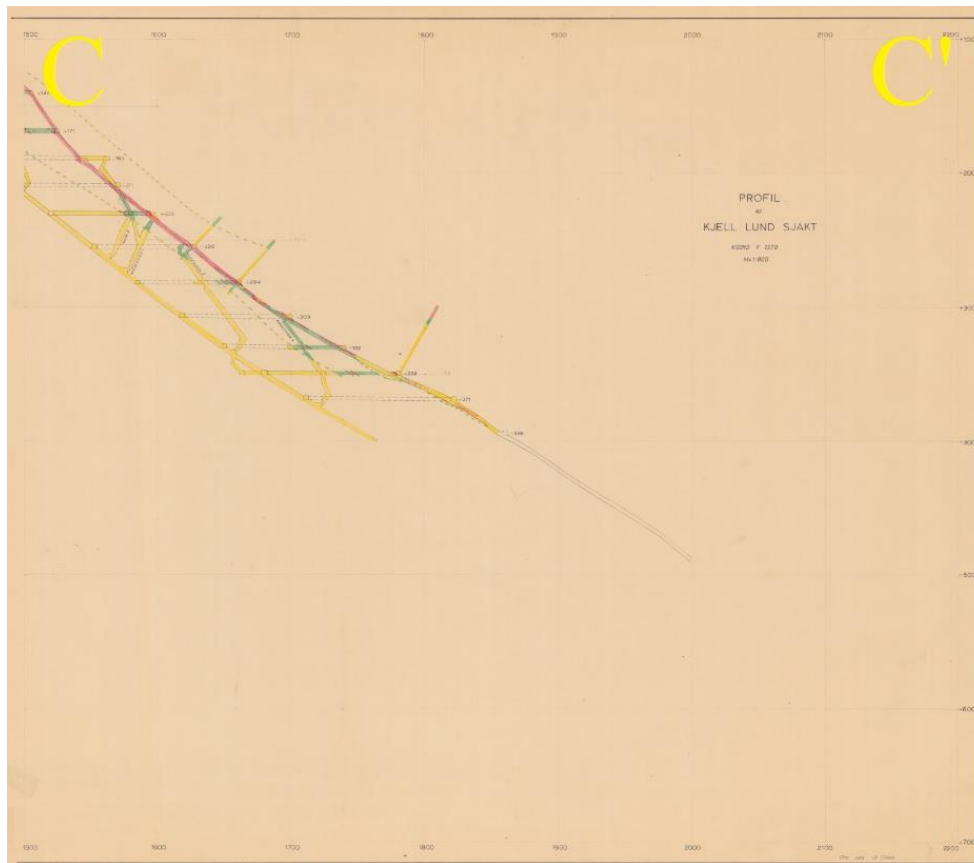
Vedlegg 6 Vertikalprofil A: Diamantborehull i Giken gruve. Modifisert fra DirMin.



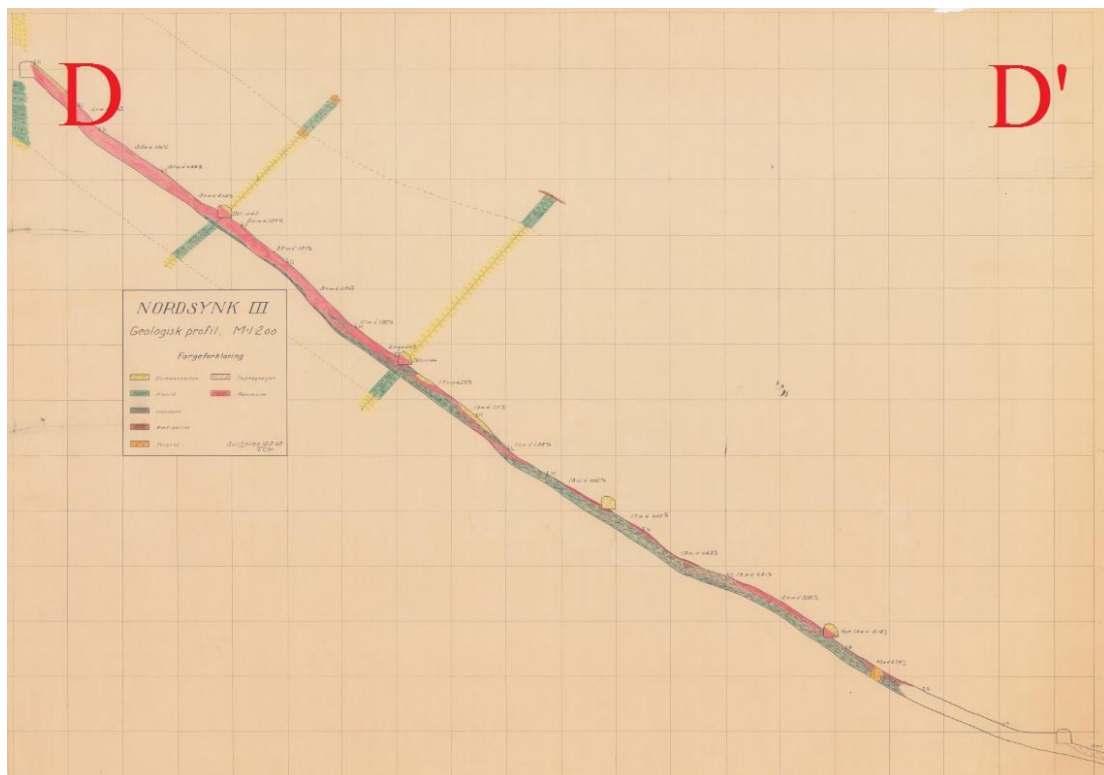
Vedlegg 7 Vertikalprofil B: Kjell Lund sjakt, øvre del. Hentet fra DirMin.



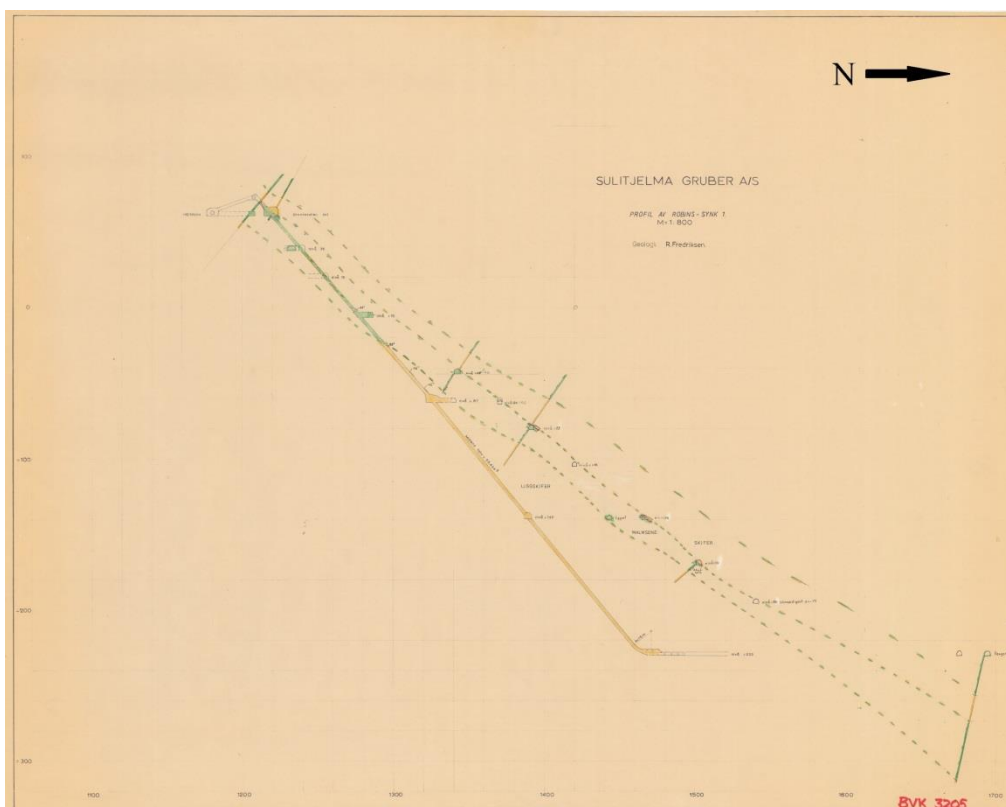
Vedlegg 8 Vertikalprofil C: Kjell Lund sjakt, nedre del. Modifisert fra DirMin.



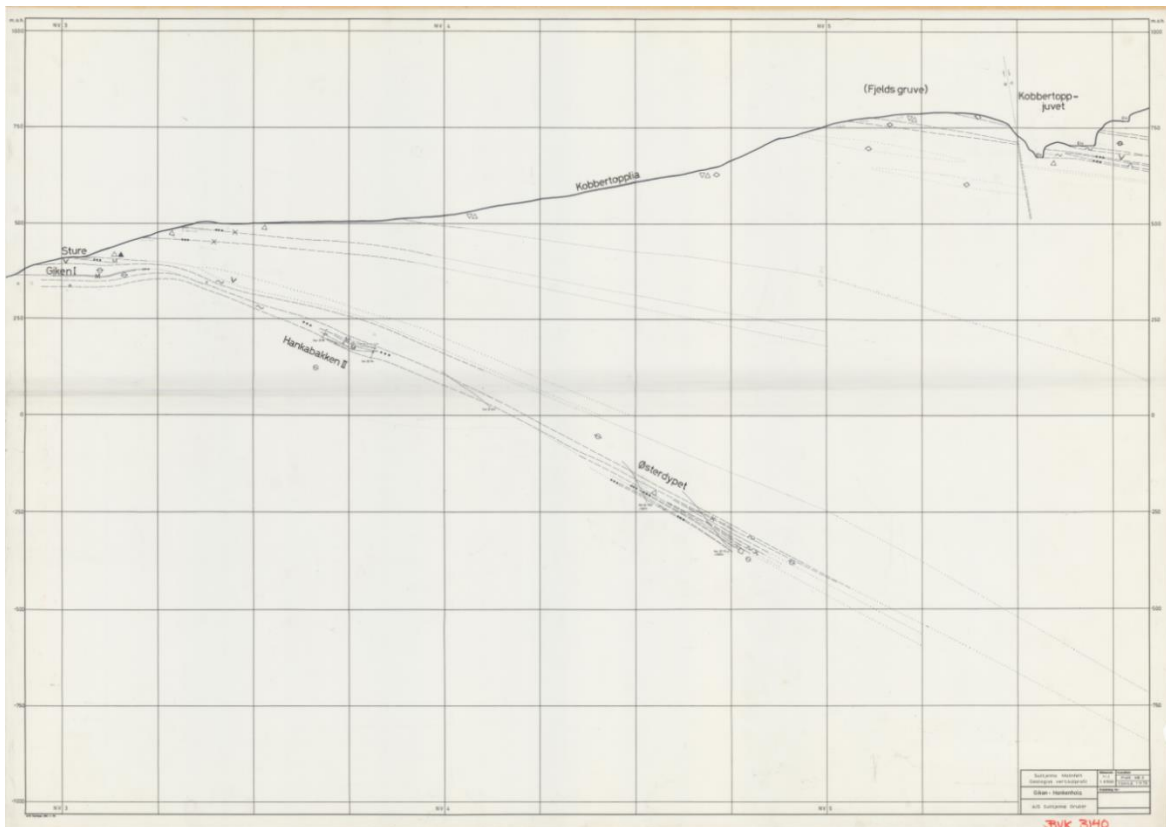
Vedlegg 9 Vertikalprofil D: Nordsynk sjakt i Giken gruve. Modifisert fra DirMin.



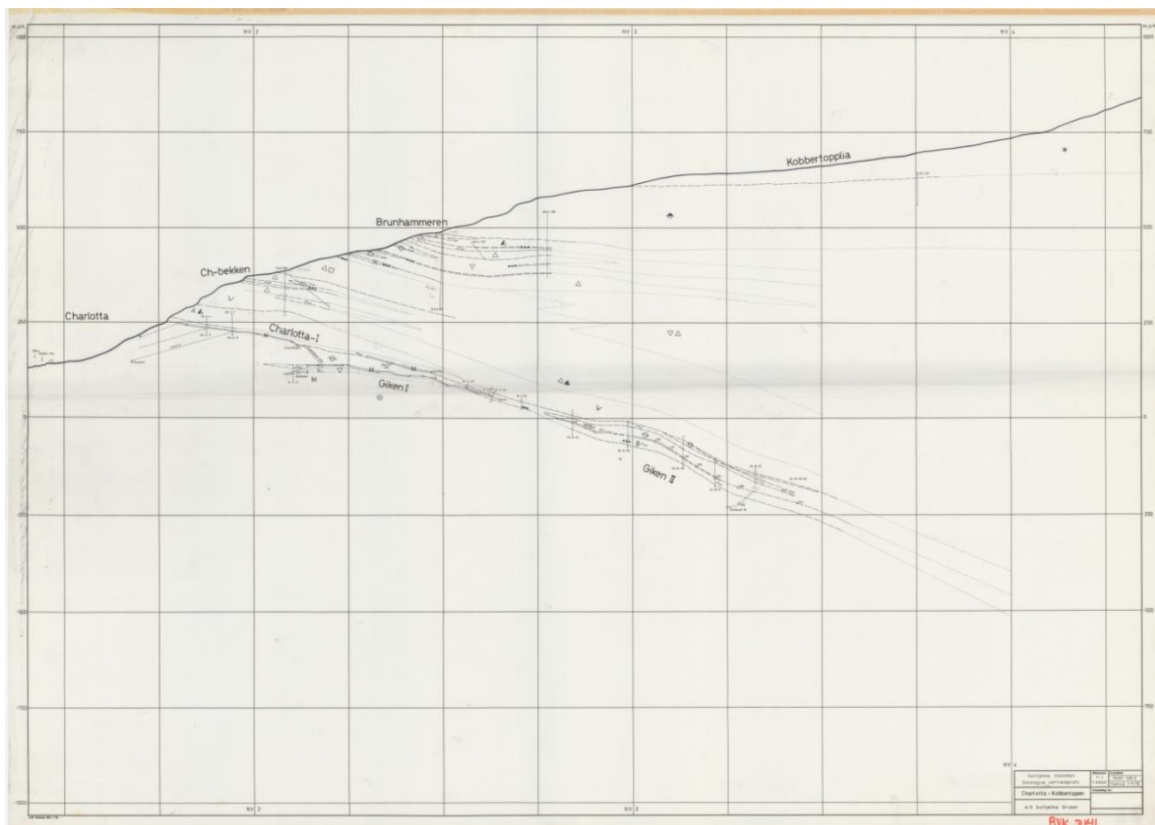
Vedlegg 10 Vertikalprofil E: Robinssynk sjakt i Giken gruve. Hentet fra DirMin.



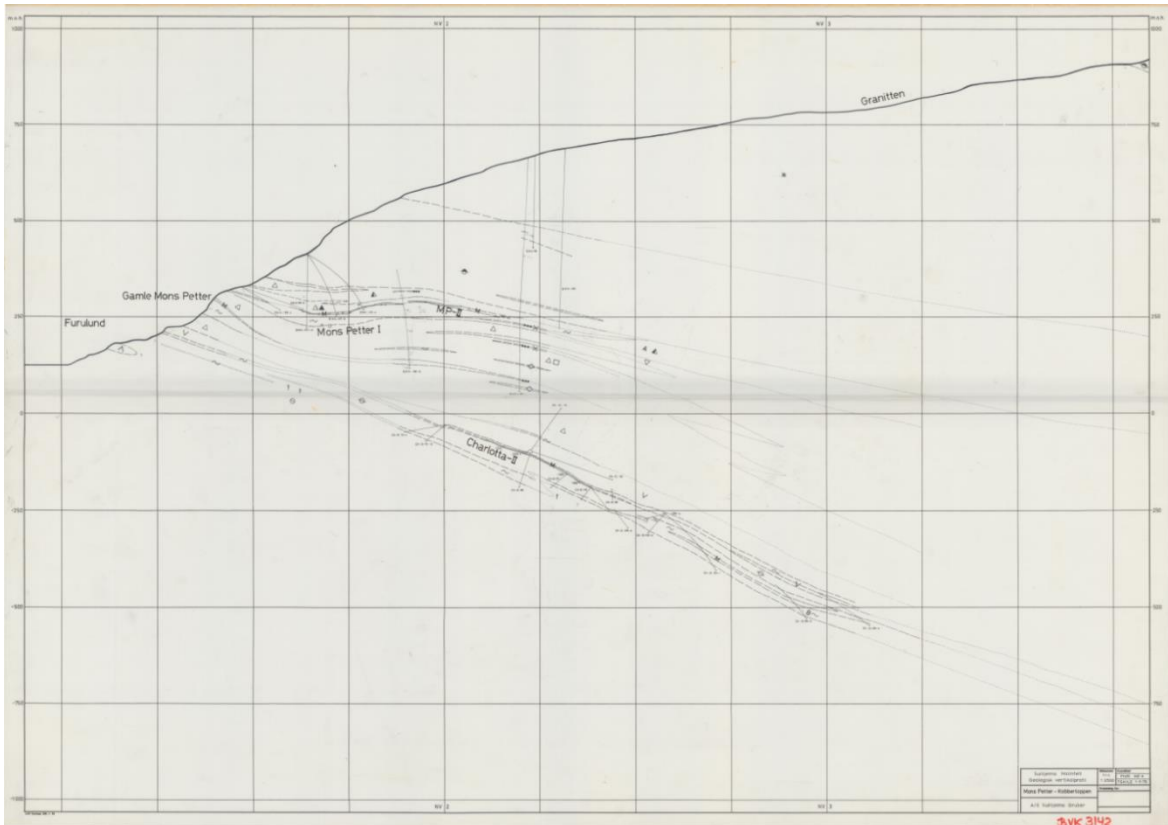
Vedlegg 11 Vertikalprofil F: NØ-2, sett mot nordvest Hentet fra Søyland Hansen (1983).



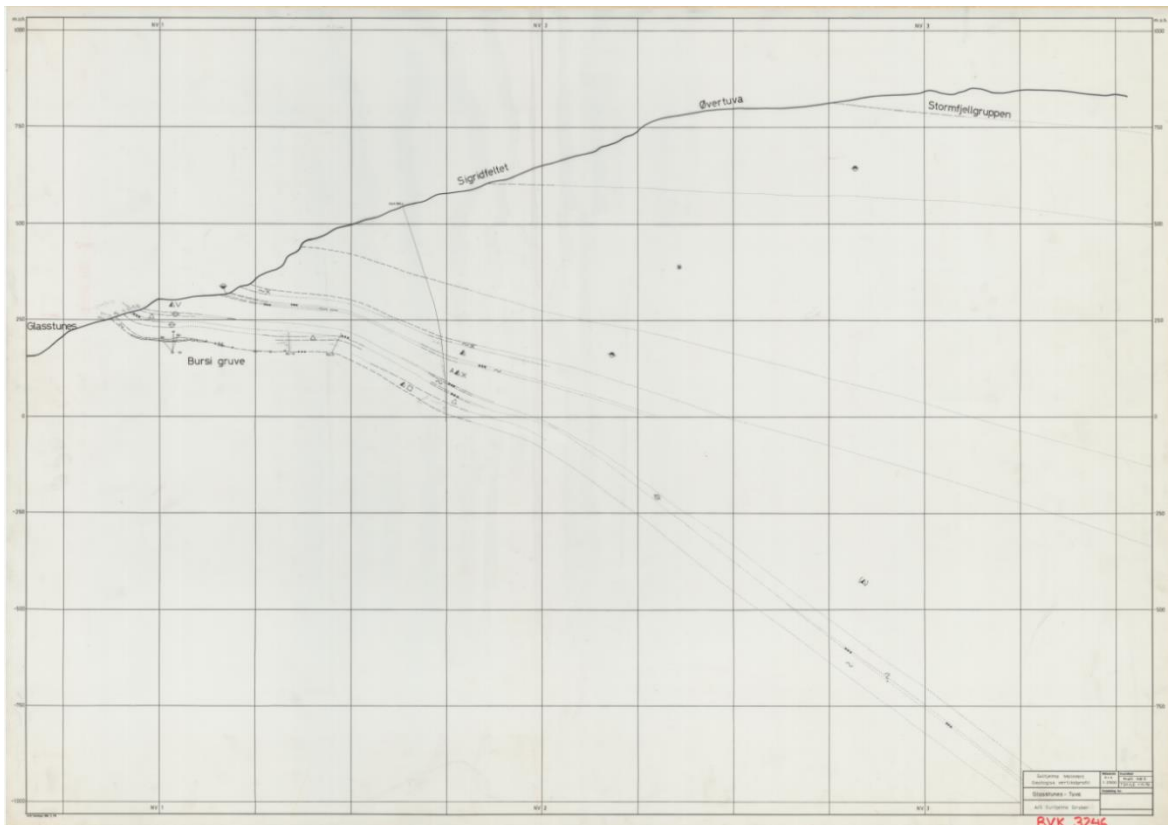
Vedlegg 12 Vertikalprofil G: NØ-3 sett mot nordvest. Hentet fra Søyland Hansen (1983).



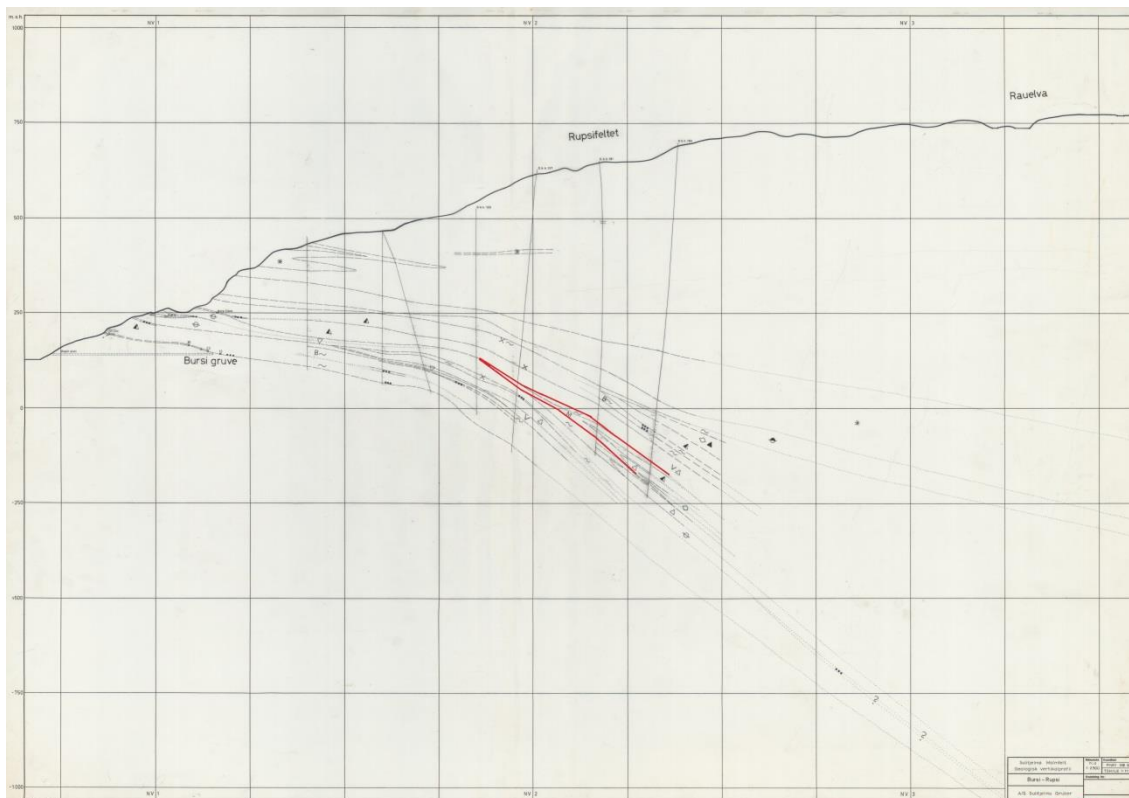
Vedlegg 13 Vertikalprofil H: NØ-4, sett mot nordvest. Hentet fra Søyland Hansen (1983).



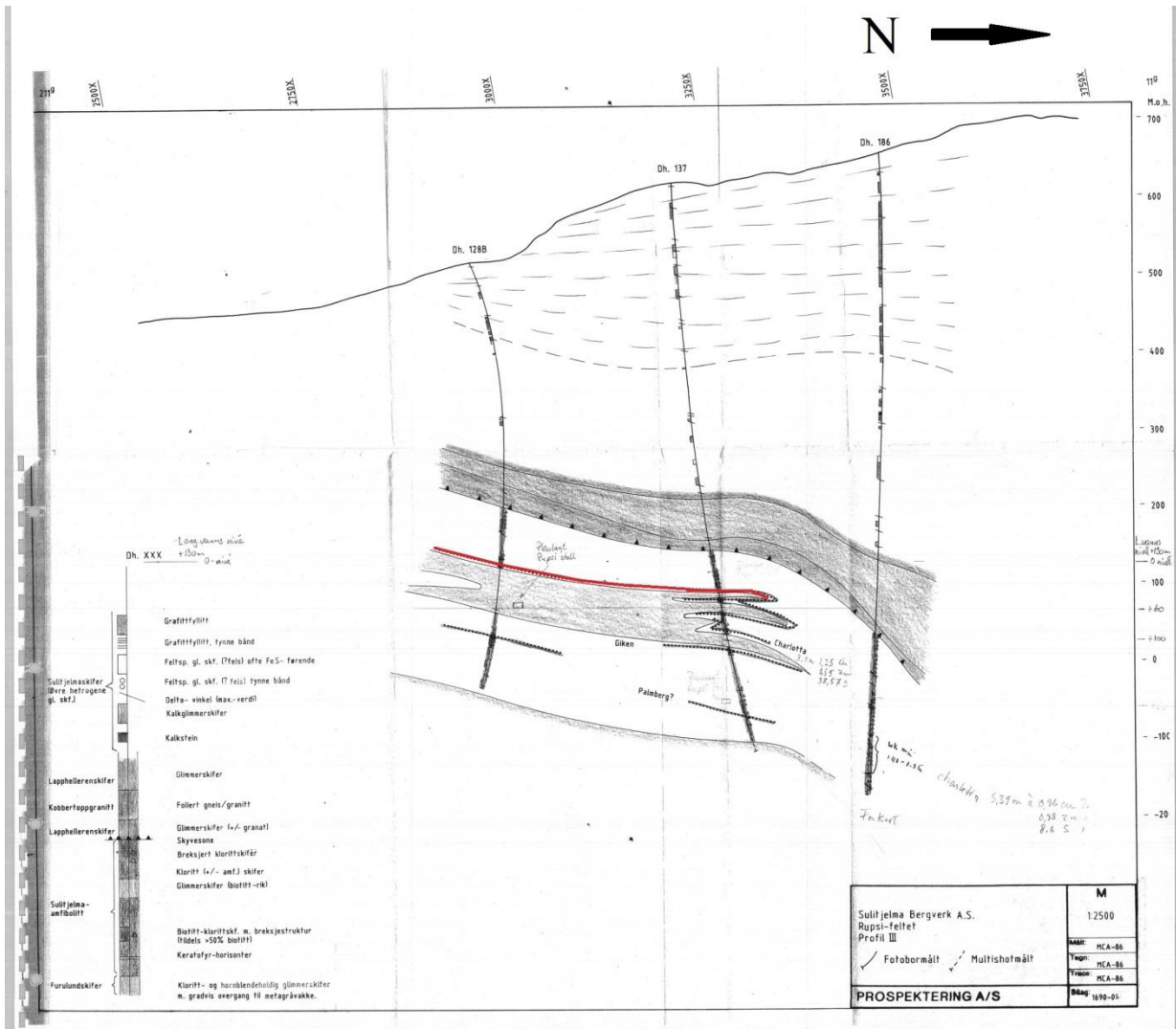
Vedlegg 14 Vertikalprofil I: NØ-5, sett mot nordvest. Hentet fra Søyland Hansen (1983).



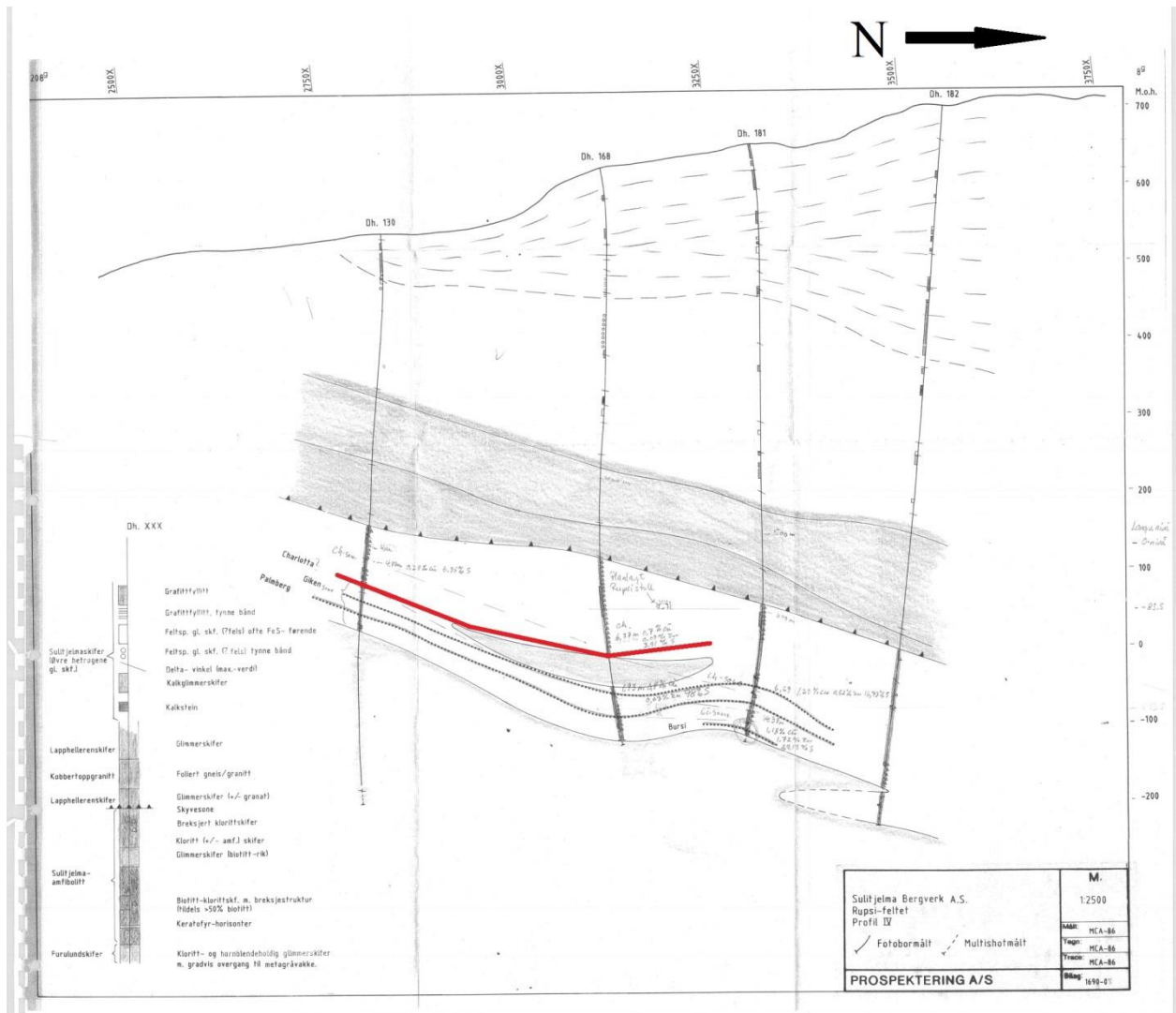
Vedlegg 15 Vertikalprofil J: NØ-6, sett mot nordvest. Rupsi-forekomsten er markert med rødt. Modifisert fra Søyland Hansen (1983).



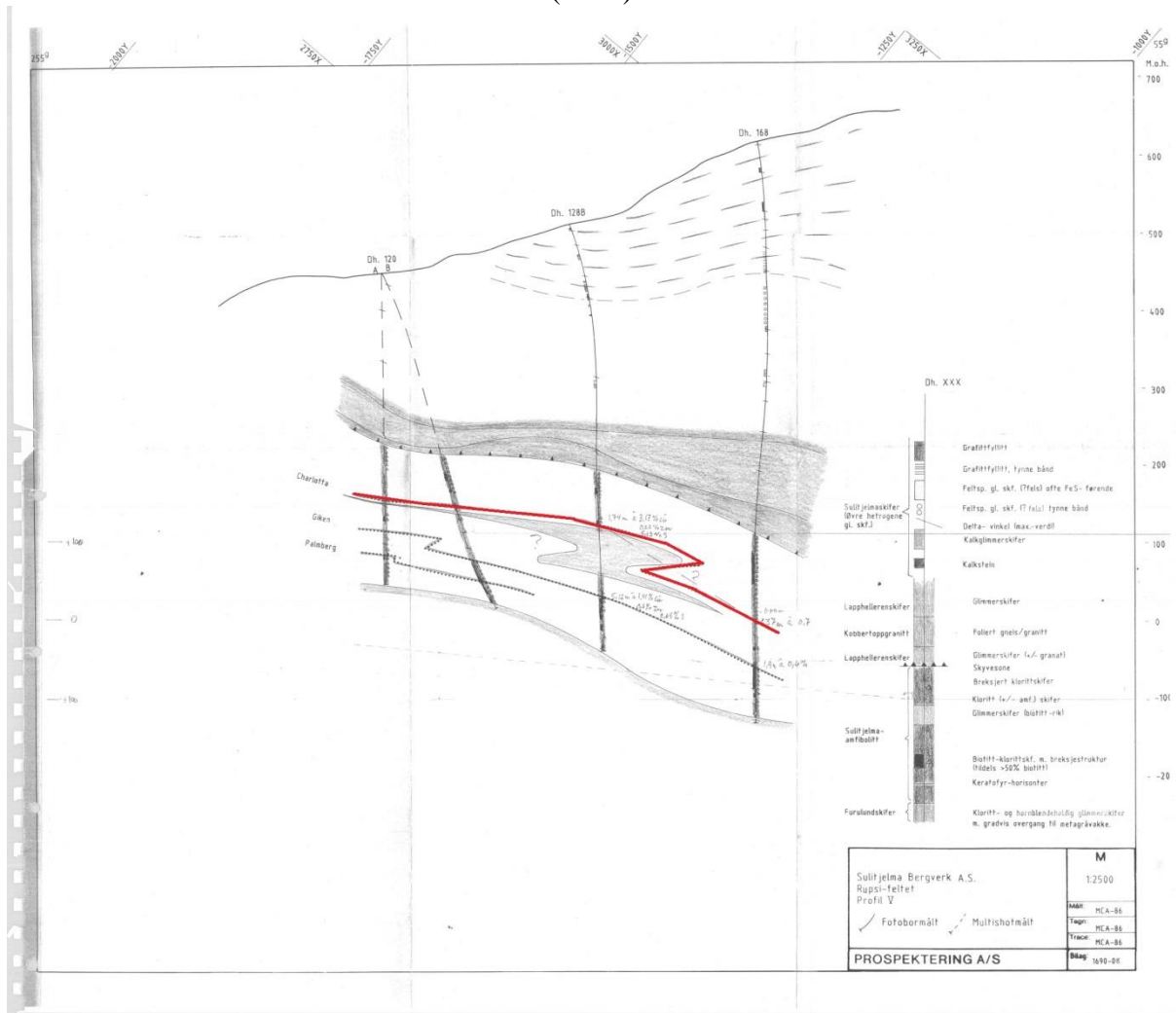
Vedlegg 16 Vertikalprofil K: Diamantborehull på Rupsi-forekomsten, profil III. Tolket Rupsi-malm markert med rødt. Modifisert fra ASPRO Prospektering AS (1986).



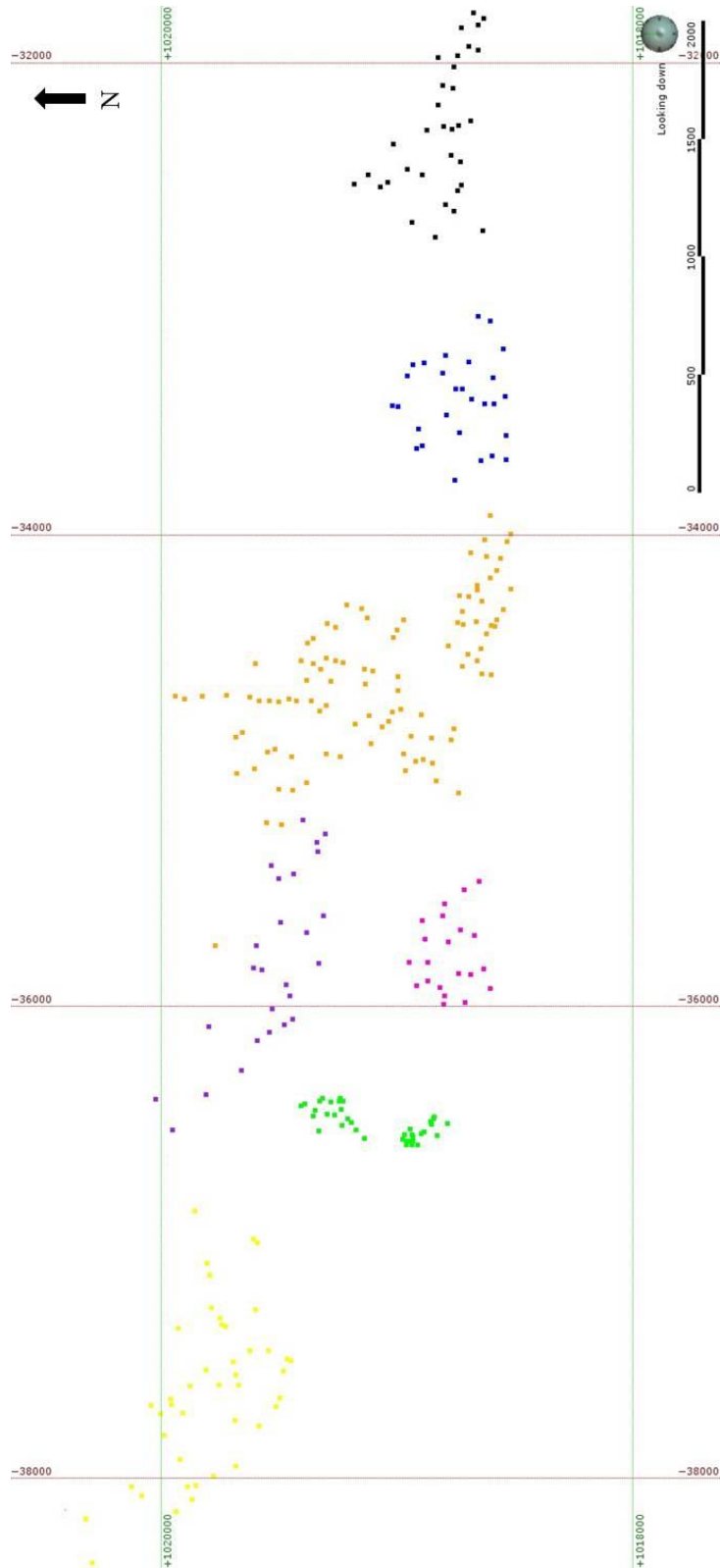
Vedlegg 17 Vertikalprofil L: Diamantborehull på Rupsi-forekomsten, profil IV. Tolket Rupsi-malm markert med rødt. Modifisert fra ASPRO Prospektering AS (1986).



Vedlegg 18 Vertikalprofil M, sett mot nordvest: Diamantborehull på Rupsi-forekomsten, profil V. Tolket Rupsi-malm markert med rødt. Modifisert fra ASPRO Prospektering AS (1986).



Vedlegg 19 Punktskyer i Leapfrog sett ovenfra. På figuren sees Bursi (gul), Mons Petter (grønn), Øvre Charlotta (rosa), Nedre Charlotta (lilla), Giken (oransj), Hankabakken (blå) og Ny Sulitjelma (svart). Modifisert fra Leapfrog.



Vedlegg 20 Punktsky-koordinater, Bursi gruve.

Nummer	Øst	Nord	Høyde
1	-37446,9	1019367	253,22
2	-37503,6	1019451	223,42
3	-37494,7	1019465	217,42
4	-37546,1	1019480	223,62
5	-37661,3	1019497	214,82
6	-37696,7	1019514	217,92
7	-37777,6	1019585	220,22
8	-37756,3	1019686	200,42
9	-37605,7	1019671	201,42
10	-37561	1019684	188,42
11	-37504,9	1019693	188,42
12	-37604,8	1019753	188,32
13	-37949	1019683	223,12
14	-37990,7	1019778	224,92
15	-37920,2	1019920	198,42
16	-37724,3	1019907	227,12
17	-37608	1019875	202,42
18	-37663,4	1019960	232,22
19	-37688,1	1019955	234,42
20	-37693,7	1020041	238,02
21	-37725,6	1020004	232,02
22	-37818,1	1019987	219,12
23	-38032,9	1019853	214,42
24	-38037	1019888	211,42
25	-38090,5	1019869	211,52
26	-38143,3	1019937	194,92
27	-38036,4	1020126	181,02
28	-38074,6	1020083	175,42
29	-38175,1	1020320	162,42
30	-38360,1	1020291	197,42

Nummer	Øst	Nord	Høyde
31	-37283.9966	1019598.8047	150,42
32	-37001.6736	1019592.4817	135,52
33	-36986.3987	1019608.2891	144,62
34	-36865.7794	1019856.9916	61,22
35	-37088.0561	1019805.3542	127,42
36	-37140.2378	1019793.2318	140,12
37	-37277.1493	1019784.8046	139,32
38	-37320.8672	1019749.5015	139,62
39	-37346.6766	1019743.7055	142,42
40	-37356.6843	1019725.2636	149,82
42	-37366.1787	1019925.9956	170,22
43	-37543.6840	1019811.1287	177,62
45	-37459.4744	1019623.9103	169,92
46	-37459.4744	1019543.9137	202,42

Vedlegg 21 Punktsky-koordinater, Mons Petter gruve.

Nummer	Øst	Nord	Høyde
1	-36487,7	1018814	232,22
2	-36467,4	1018843	234,42
3	-36489,3	1018858	241,92
4	-36531,5	1018888	243,42
5	-36567	1018935	258,42
6	-36585,1	1018938	268,82
7	-36570	1018960	268,42
8	-36543,9	1018970	268,82

Vedlegg 22 Punktsky-koordinater, Nedre Charlotta gruve (venstre) og øvre Charlotta gruve (høyre).

Nummer	Øst	Nord	Høyde
1	-35481,2	1019333	-92,58
2	-35438,5	1019439	-159,58
3	-35457,5	1019500	-181,58
4	-35402,8	1019532	-198,18
5	-35342,7	1019337	-93,58
6	-35303,2	1019341	-94,08
7	-35270,3	1019306	-84,58
8	-35211,3	1019400	-133,58
9	-35617,8	1019310	-67,18
10	-35688,1	1019383	-102,58
11	-35644,5	1019495	-158,58
12	-35743,5	1019594	-192,58
13	-35817,9	1019331	-64,18
14	-35956,4	1019454	-85,58
15	-35906,2	1019469	-101,58
16	-35845	1019572	-157,58
17	-35837,3	1019607	-178,58
18	-36055,1	1019442	-59,88
19	-36078,2	1019478	-68,58
20	-36009,2	1019530	-100,58
21	-36110,7	1019542	-86,58
22	-36146,3	1019592	-99,58
24	-36084,3	1019799	-189,58
25	-36395	1020021	-174,58
26	-36375	1019810	-97,58
27	-36271,2	1019658	-98,58
28	-36523,9	1019953	-95,58

Nummer	Øst	Nord	Høyde
1	-35839,9	1018539	240,72
2	-35471,1	1018652	248,42
3	-35506,9	1018715	220,42
4	-35674,6	1018732	200,42
5	-35637,2	1018895	142,42
6	-35715,1	1018883	141,42
7	-35920,5	1018820	139,42
8	-35956,2	1018798	140,42
9	-35861,5	1018739	171,42
10	-35865,2	1018689	195,42
11	-35842,9	1018635	212,42
12	-35922,1	1018605	214,12
13	-35566,1	1018800	179,42
14	-35616,9	1018805	177,42
15	-35726,4	1018784	175,42
16	-35697,1	1018671	216,42
17	-35983,9	1018711	175,42
18	-35992,7	1018805	141,42
19	-35893,5	1018868	107,42
20	-35811,7	1018872	139,42
21	-35910,9	1018917	107,42
22	-35815,3	1018949	108,42

Vedlegg 23 Punktsky-koordinater, Rupsi-stollen.

Nummer	Øst	Nord	Høyde
1	-38435,5	1020112	138,42
2	-38134,9	1020404	140,42

Vedlegg 24 Punktsky-koordinater, Ny Sulitjelma gruve (venstre) og Hankabakken gruve (høyre).

Nummer	Øst	Nord	Høyde
1	-32986,5967	1018825,184	357,42
2	-32740,2561	1018836,889	361,42
3	-32600,4838	1018796,397	447,02
4	-32627,6793	1018759,702	472,42
5	-32542,9305	1018743,253	490,22
6	-32711,4794	1018637,28	544,62
7	-32517,9486	1018726,171	507,42
8	-32419,6021	1018730,599	549,42
9	-32391,7741	1018771,407	511,42
10	-32245,9936	1018686,945	610,42
11	-32264,3347	1018738,824	590,42
12	-32280,4623	1018766,029	552,42
13	-32268,1294	1018802,092	531,42
14	-32108,4349	1018764,131	574,42
15	-31945,2619	1018656,576	707,42
16	-31930,3992	1018698,016	665,42
17	-31969,9276	1018745,151	616,42
18	-32015,4642	1018759,702	594,42
19	-31811,8142	1018632,218	773,42
20	-31838,6935	1018658,158	741,42
21	-31788,0972	1018677,771	742,42
22	-31851,3425	1018729,967	709,42
23	-31976,8846	1018827,399	654,42
24	-32097,367	1018806,837	533,42
25	-32180,1591	1018828,644	510,42
26	-32287,0438	1018873,248	432,42
27	-32472,6689	1018892,861	371,42
28	-32452,7466	1018957,077	312,42
29	-32343,8065	1019017,893	276,12
30	-32505,7146	1019039,721	239,42
31	-32473,1432	1019124,183	173,12
32	-32514,8852	1019182,705	123,42
33	-32527,8505	1019069,456	204,42
34	-32675,2122	1018938,176	278,42

Nummer	Øst	Nord	Høyde
1	-33940,7	1018749	341,42
2	-33770,8	1018757	345,42
3	-33686,8	1018645	413,42
4	-33665,6	1018599	441,42
5	-33682,7	1018538	466,42
6	-33578,6	1018539	488,82
7	-33413,4	1018543	522,42
8	-33443,7	1018592	489,42
9	-33333,4	1018596	495,42
10	-33213,3	1018549	544,42
11	-33092,8	1018604	533,42
12	-33075,9	1018657	497,42
13	-33269,6	1018695	442,42
14	-33383	1018725	410,42
15	-33426,6	1018685	441,42
16	-33445,3	1018630	466,42
17	-33569,6	1018737	387,82
18	-33491,5	1018792	349,42
19	-33381,5	1018750	387,42
20	-33239,6	1018794	364,42
21	-33315,6	1018807	353,42
22	-33270,5	1018888	282,42
23	-33280,5	1018932	261,92
24	-33325,9	1018955	237,42
25	-33453,5	1019020	207,42
26	-33456,4	1018997	210,62
27	-33551,9	1018910	262,82
28	-33624,8	1018894	259,82
29	-33636,1	1018916	236,92

Vedlegg 25 Punktsky-koordinator, Giken gruve.

Nummer	Øst	Nord	Høyde
81	-34385,8	1018600	289,42
82	-34422,1	1018622	278,42
83	-34369,1	1018667	267,42
84	-34382,3	1018720	277,42
85	-34482,1	1018644	255,42
86	-34536	1018661	239,42
87	-34506,8	1018700	238,52
88	-34559,4	1018725	226,42
89	-34472,8	1018783	244,92
90	-34361,6	1018975	244,42
91	-34436,3	1019018	196,42
92	-34753,2	1019020	140,52
93	-34740,4	1018985	161,92
94	-34764,7	1018898	188,42
95	-34822,7	1018758	217,42
96	-34870,8	1018771	212,52
97	-34862,4	1018856	187,72
98	-34854	1018941	166,42
99	-34962,6	1018921	174,42
100	-34951,1	1018890	188,42
101	-34967,9	1018849	197,42
102	-35095,9	1018739	204,42
103	-35043,4	1018835	189,42

Nummer	Øst	Nord	Høyde
41	-34746,7	1019329	-41,58
42	-34703,9	1019428	-110,88
43	-34707,4	1019500	-181,98
44	-34704,4	1019542	-204,98
45	-34544,9	1019601	-223,58
46	-34705	1019584	-224,18
47	-34687,7	1019623	-243,68
48	-34682,1	1019724	-307,58
49	-34683	1019825	-367,58
50	-34684,1	1019938	-426,58
51	-34698,1	1019901	-405,58
52	-34920,6	1019549	-203,58
53	-35743,1	1019768	-260,58
54	-35053,6	1019385	-126,18
55	-34929,8	1019302	-62,68
56	-34940,8	1019241	-40,58
57	-34099,9	1018563	394,72
58	-34229,4	1018521	373,92
59	-34078,1	1018689	377,42
60	-34214	1018659	335,42
61	-34257,6	1018735	309,42
62	-34326	1018724	291,22
63	-34371,5	1018742	278,42
64	-34317,9	1018552	336,42
65	-34592,9	1018602	258,22
66	-34591,1	1018643	242,92
67	-34929,7	1018974	153,42
68	-34999,6	1018963	154,42
69	-33919,3	1018606	421,42
70	-34021,8	1018631	397,92
71	-34028,8	1018536	417,62
72	-33997,5	1018519	427,42
73	-34152,8	1018577	373,42
74	-34093,6	1018621	375,42
75	-34183,7	1018606	353,42
76	-34236,6	1018663	320,92
77	-34283,4	1018642	308,42
78	-34261,4	1018695	310,12
79	-34359,4	1018578	308,42
80	-34389	1018584	299,42

Nummer	Øst	Nord	Høyde
1	-35455,4	1019640	-262,58
2	-35222,8	1019552	-220,08
3	-35227,8	1019488	-201,58
4	-35078,3	1019501	-181,28
5	-34993,7	1019606	-241,58
6	-35014,1	1019679	-289,58
7	-34859,1	1019685	-284,58
8	-34837,9	1019654	-267,58
9	-34911,5	1019516	-181,58
10	-34942,3	1019446	-155,58
11	-35085	1019443	-154,78
12	-34694,6	1019460	-155,28
13	-34533,7	1019408	-128,58
14	-34460,9	1019380	-104,08
15	-34439,4	1019354	-83,08
16	-34547,3	1019356	-83,58
17	-34704,8	1019365	-82,58
18	-34793	1019034	102,72
19	-34816	1019062	84,92
20	-34885,5	1019110	47,42
21	-34765,9	1019118	66,92
22	-34804,2	1019178	23,42
23	-34633,1	1019134	77,22
24	-34660,3	1018998	113,42
25	-34603,6	1018995	127,42
26	-34578,8	1019101	86,42
27	-34570,1	1019138	72,82
28	-34403,8	1018999	187,42
29	-34353,5	1019127	83,42
30	-34312,6	1019151	63,42
31	-34297,5	1019212	23,42
32	-34376,5	1019297	-42,58
33	-34391,9	1019261	-13,58
34	-34540,7	1019227	20,92
35	-34534,4	1019259	-14,58
36	-34523,4	1019298	-43,58
37	-34569	1019323	-58,08
38	-34617,1	1019382	-104,28
39	-34619,9	1019280	-14,58
40	-34723,1	1019300	-13,58

Vedlegg 26 Tabell for bestemmelse av Hoek-Brown konstanten m_i for den numeriske analysen. Hentet fra Examine2D.

Pick Mi Value

List of Mi Values

Agglomerate	19 ± 3
Amphibolites	26 ± 6
Andesite	25 ± 5
Anhydrite	12 ± 2
Basalt	25 ± 5
Breccia	19 ± 5
Breccias	19 ± 5
Chalk	7 ± 2
Claystones	4 ± 2
Conglomerates	21 ± 3
Crystalline Limestone	12 ± 3
Dacite	25 ± 3
Diabase	15 ± 5
Diorite	25 ± 5
Dolerite	16 ± 5
Dolomites	9 ± 2

Selected Mi Value

Mi Value: 20

Filter List

Rock Type

- Sedimentary
- Igneous
- Metamorphic

Texture

- Coarse
- Medium
- Fine
- Very Fine

OK Cancel

Vedlegg 27 Bestemmelse av forstyrrelsesfaktor, D, basert på drivemetode og bergmassekvalitet. Hentet fra Examine2D.

Disturbance Factor D

Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.

D=0

Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass.

Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.

D=0.5
No Invert

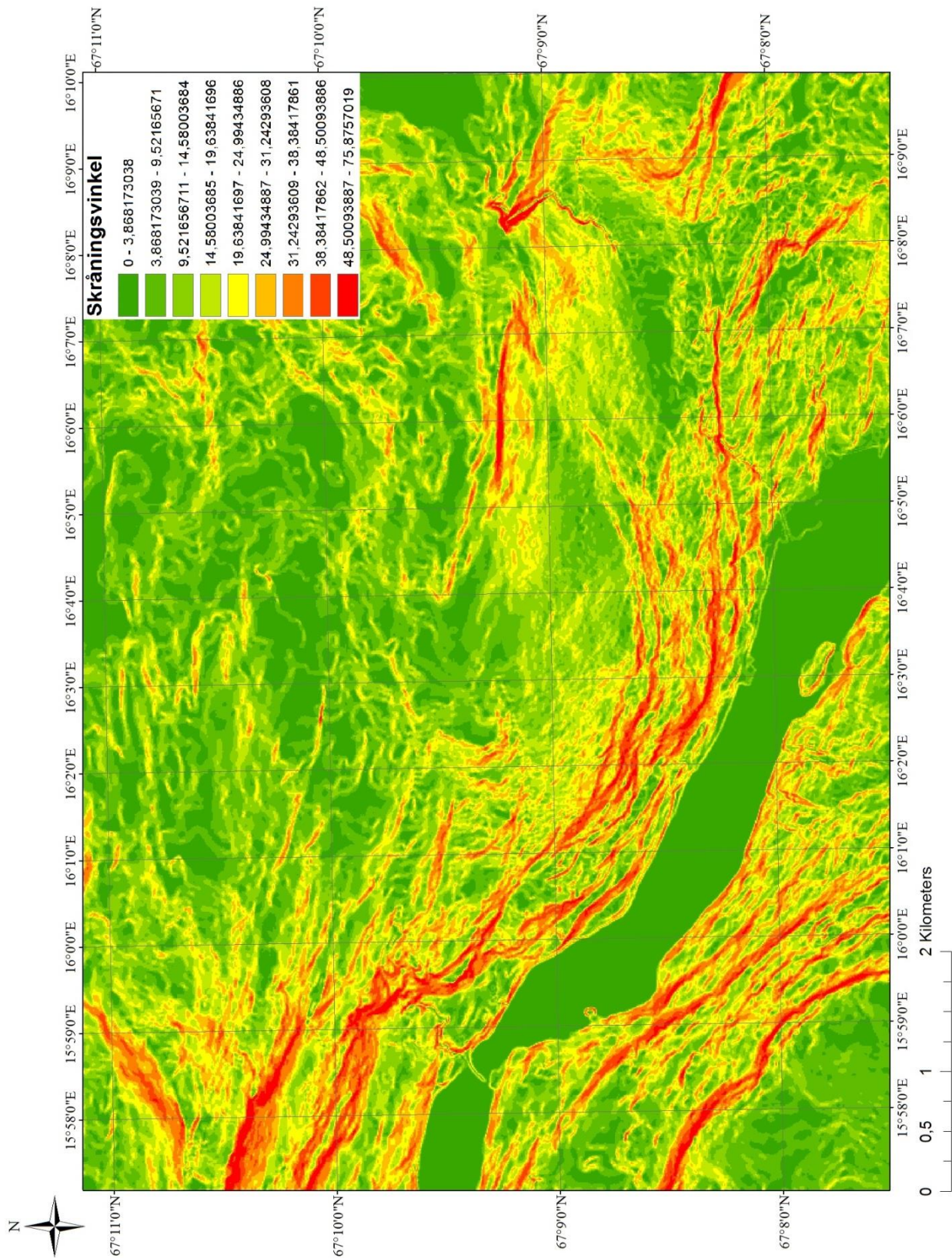
Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.

D=0.8

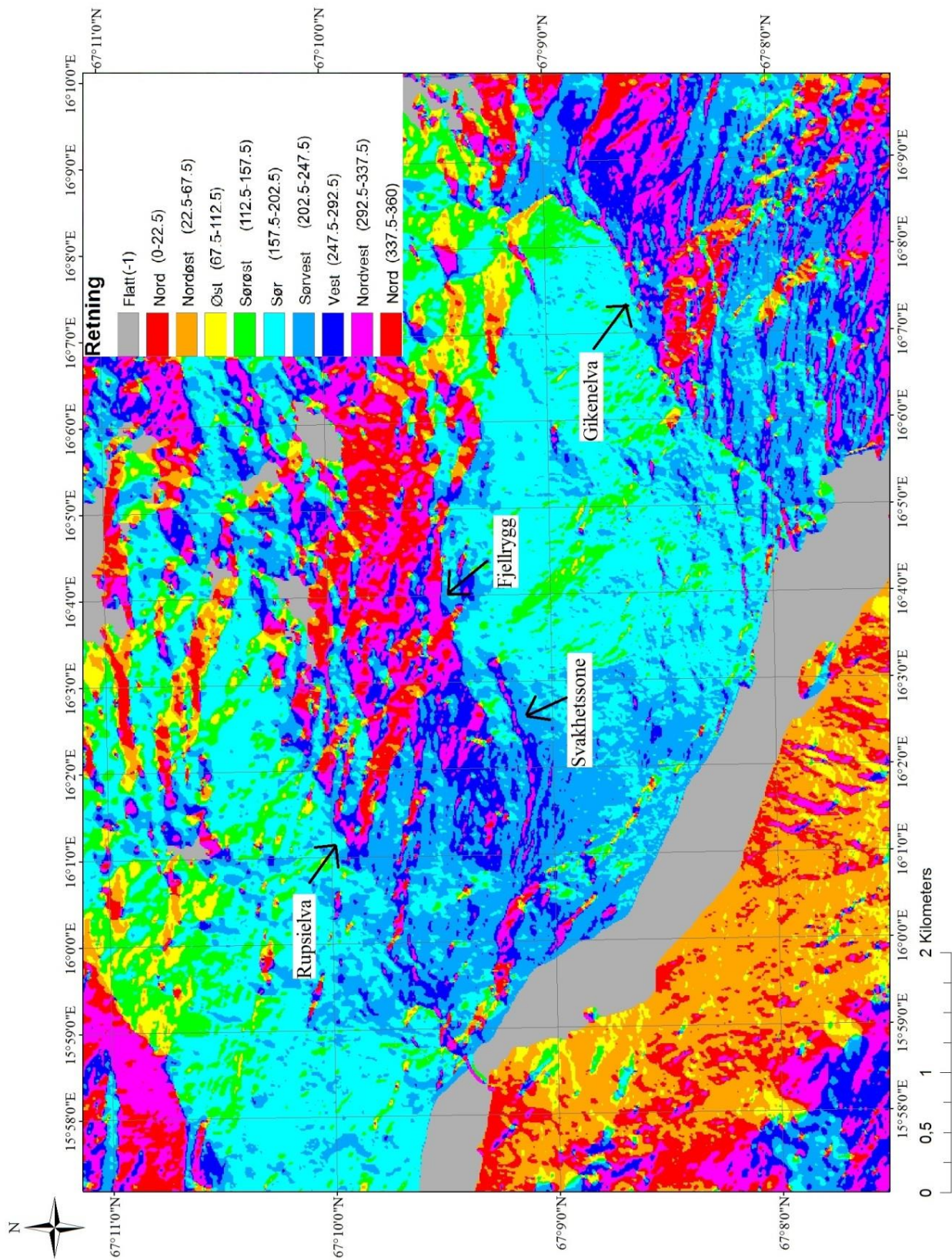
Disturbance Factor: 0

OK Cancel

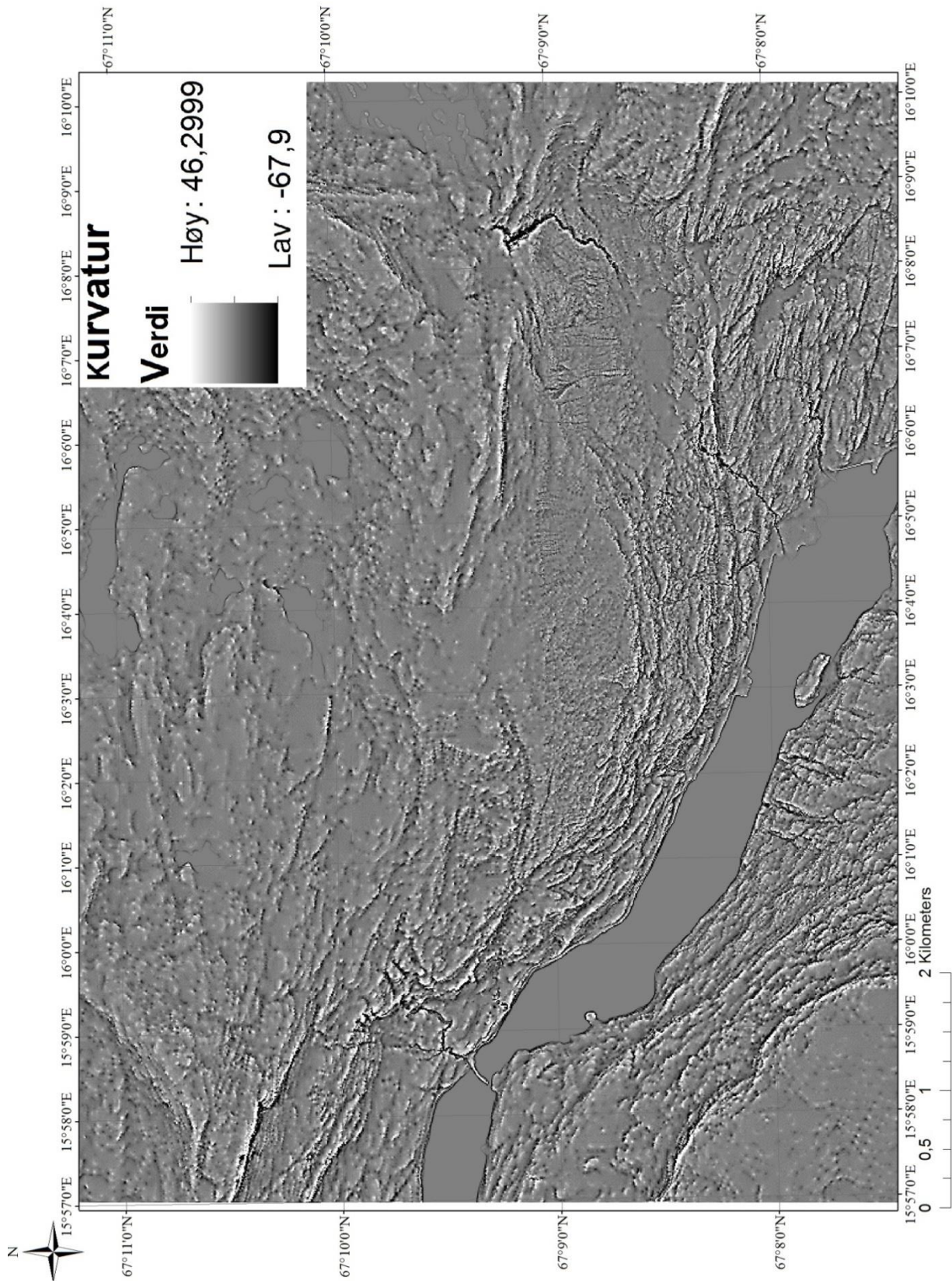
Vedlegg 28 Relieffkart generert med funksjonen «Slope». Tegnforklaring angitt i grader. Modifisert fra ArcGIS.



Vedlegg 29 Relieffkart generert med funksjonen «Aspect». Modifisert fra ArcGIS.



Vedlegg 30 Relieffkart generert med funksjonen «Curvature». Modifisert fra ArcGIS.



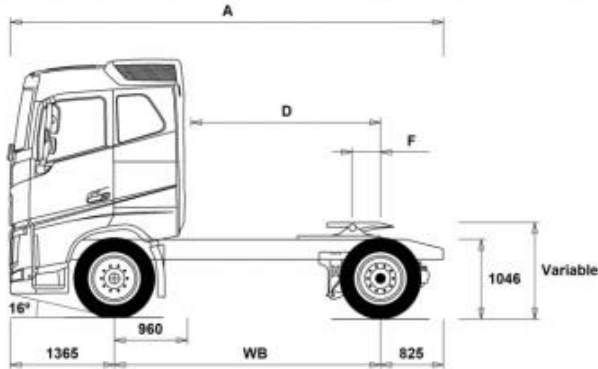
Vedlegg 31 Spesifikasjoner for lastebilen Volvo FH 16.

MODEL RANGE



Volvo Trucks. Driving Progress

FH 16 4x2 Tractor - Rear Air Suspension FH 42 T6HA



Chassis Dimensions [mm]

WB Wheelbase	3500	3600	3700	3800
A Overall Chassis Length	5690	5790	5890	5990
D Center of rear axle to back of cab	2490	2590	2690	2790
F Fifth Wheel Position (EC Directive 96/53)	375	475	575	675

Chassis Weights [kg]

Front Axle	5500	5505	5505	5510
Rear Axle	2055	2060	2065	2070
Kerb Weight	7555	7565	7570	7580

Turning Diameter [mm]

Turning Circle Diameter Kerb to Kerb	12700	13100	13400	13700
Turning Circle Diameter Wall to Wall	14100	14400	14700	15000

Plated Weights [kg]

	Plated	Design
Gross Vehicle Weight	18000	21000
Gross Combination Weight	40000	44000
Front Axle	8000	8000
Rear Axle	11500	13000