STATSBYGG
MOTTATT
0 8 SEPT 2006

**Norconsult AS, Hovedkontor**
Vestfjordgaten 4, 1338 Sandvika
Telefon: 67 57 10 00
Telefax: 67 54 45 76
E-post: firmapost@norconsult.no
www.norconsult.no
Bankgiro: 6219 05 51666
Foretaksreg.: NO 962392687 MVA

Statsbygg
Postboks 8106 Dep.
0032 Oslo

Ved: Peder Hagen

| Deres ref.: | Vår ref.: | Dato: |
|---|---|---|
| | 4549700\...\hak0139b.doc | 7. september 2006 |

**PROSJEKT 10863 RIKSARKIVET PÅ KRINGSJÅ - FJELLMAGASIN - BYGGETRINN 2**
**SPENNINGSANALYSE AV FJELLHALLER**

Vedlagt finner du tre eksemplarer av rapport fra spenningsanalysen som er utført for fjellhallene.

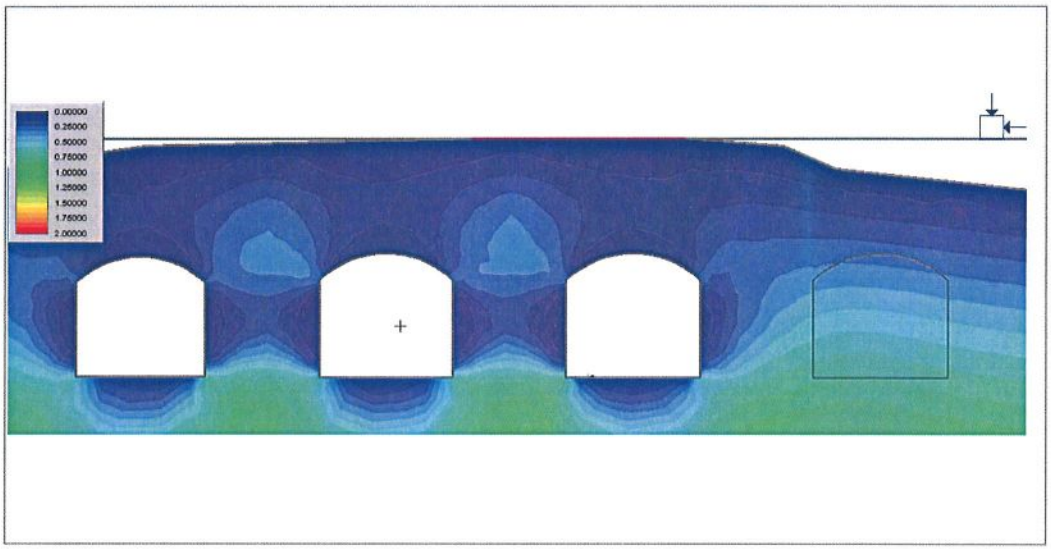
Med hilsen
**Norconsult AS**

Hanne Knudsmoen

Hanne Knudsmoen

Vedlegg: 3 stk rapporter

STATSBYGG




# RIKSARKIVET PÅ KRINGSJÅ

# FJELLMAGASIN - BYGGETRINN 2

# SPENNINGSANALYSE AV FJELLHALLER

September 2006

Norconsult

Norconsult

**Norconsult AS, Hovedkontor**
Vestfjordgaten 4, 1338 Sandvika
Telefon: 67 57 10 00
Telefax: 67 54 45 76
E-post: firmapost@norconsult.no
www.norconsult.no
Foretaksreg.: NO 962392687 MVA

# RAPPORT

| | |
|---|---|
| TITTEL | **RIKSARKIVET PÅ KRINGSJÅ<br>FJELLMAGASIN - BYGGETRINN 2<br>SPENNINGSANALYSE AV FJELLHALLER** |
| OPPDRAGSGIVER | Statsbygg |
| OPPDRAGSGIVERS KONTAKTPERSON | Peder Hagen |
| OPPDRAGSNUMMER: 4549700 | DOKUMENTNUMMER: |
| UTARBEIDET | Thomas K. Mathiesen |
| DATO: 6. september 2006 | REVISJON: 0 |
| FAGKONTROLLERT | Hanne Knudsmoen |
| ANTALL SIDER: 9 | GODKJENT: Morten Lund |


## SAMMENDRAG

Riksarkivet på Kringsjå består i dag av 3 fjellhaller; "A", "B" og "C". Anlegget skal nå utvides med en ny hall "D", og fremtidig ytterligere 2 nye haller. Denne rapporten evaluerer effekten bygging av fremtidige haller vil kunne ha på dagens byggetrinn (hall "D"), som et verktøy til vurdering av nødvendig sikring i dagens byggetrinn.

Det er utført analytisk og nummerisk analyse av spenningstilstanden rundt hallene.

Analysene av spenninger i stabben mellom hallene illustrerer hvordan hallene gjensidige påvirker hverandre. De analytiske beregningene bekrefter spenningstilstanden i de numeriske.

Ut fra en ren spenningsanalyse vurderes en avstand mellom hallene på ca 15 m å være uproblematisk, og spenningsinduserte belastninger synes håndterbare med konvensjonell sikring.

Analysene viser at stabbene mellom hallene får en ekstra belastning av nabohallen, men blir ikke betydelig belastet av ytterligere haller lenger unna.

- **Forutsatt bergmassekvalitet som benyttet i denne analysen anbefales 6 meter boltelengde i veggene i hall "D".**

Analysene med forskjellig *k*-faktor viser to trender:

- Ved høyere horisontalspenninger øker den totale belastningen rundt hallene noe, men samtidig blir spenningene mer homogene, og faren for manglende innspenning i hengen reduseres.
- Ved lavere horisontalspenninger øker faren for manglende innspenning i hengen (med eventuelt påfølgende fare for blokkutfall).

Det vil trolig opptre tilfeller der manglende innspenning gir mulighet for blokkutfall. Slike blokkutfall må sikres på stedet, med de nødvendige kapasiteter og lengder på sikringsmidlene. Manglende innspenning i vederlag/heng i analysen indikerer behov for relativ tung og systematisk sikring i hengen.

Forhold nevnt i denne rapporten bør følges spesielt opp av ingeniørgeolog under driving av hall "D".

## INNHOLDSFORTEGNELSE

1 INNLEDNING 2
2 GRUNNLAG 2
3 INNGANGSPARAMETRE 2
3.1 Bergmekaniske parametre 2
3.2 Spenninger 3
4 ANALYTISK SPENNINGSBEREGNING 3
5 NUMMERISK SPENNINGSANALYSE 4
6 RESULTATER FRA ANALYSER 4
6.1 Spenningsfordeling rundt én åpning 4
6.2 Spenningsfordeling rundt to åpninger 5
6.3 Evaluering av resultater fra nummerisk analyse 6
7 KONKLUSJON / ANBEFALTE TILTAK 9

## FIGURLISTE

Figur 1 Utsnitt av elementmodell fra *Phase*[2] 4
Figur 2 Spenningsfordeling rundt én sirkulær åpning, fra numerisk og analytisk analyse 5
Figur 3 Spenningsfordeling i stabben mellom hallene (fra numerisk og analytisk analyse). 5
Figur 4 Største hovedspenning, $\sigma_1$, (resultater fra modell med *k*-faktor = 1,0). 6
Figur 5 Utvikling av minste hovedspenning, $\sigma_3$, ved utsprengning av hall "D", "E" og "F" (resultater fra modell med *k*-faktor = 1,0). 7
Figur 6 Sikkerhetsfaktor mot brudd (konturer fra 0,9 til 1,5), (resultater fra modell med *k*-faktor (fra toppen): 0,25, 0,5, 1,0 & 1,5) 8

# 1 INNLEDNING

Riksarkivet på Kringsjå består i dag av 3 fjellhaller; "A", "B" og "C". I byggetrinn 2 skal dette anlegget nå utvides med en ny hall, "D", parallell med "C". Denne rapporten evaluerer den effekten bygging av 2 fremtidige haller, "E" og "F", vil kunne ha på dagens byggetrinn (hall "D"), basert på analytisk og nummerisk analyse av spenningstilstanden rundt hallene. Det er antatt at disse fremtidige hallene har samme dimensjon som hall "D".

Avstanden mellom hallene er bestemt, ut fra behov for å kunne plassere alle hallene innenfor en begrenset kolle. I denne rapporten er det sett nærmere på spenningsforholdene rundt hallene, som et hjelpemiddel til å vurdere om det, på grunn av de fremtidige hallene, vil være nødvendig å installere noe lengre sikringsbolter i veggene og hengen i hall "D".

# 2 GRUNNLAG

Grunnlagsmaterialet for arbeidet med spenningsanalysen i denne rapporten er følgende:

- Tegninger av Byggetrinn 1 (utvidelse av anlegget med hall C), Berdal Strømme, 1995
- Anbudstegninger for nytt anlegg (samt fremtidig utvidelse), Norconsult, 2006
- Bergarters mekaniske egenskaper, STF22 A98034, SINTEF Bergteknikk, Mars 1998

# 3 INNGANGSPARAMETRE

## 3.1 Bergmekaniske parametre

Det finnes ingen spesifikke data for bergmassens mekaniske egenskaper i prosjektområdet. Disse er dermed vurdert ut fra laboratorietesting og erfaring med tilsvarende bergarter (SINTEF rapport, 1998), og fra kartlegging av bergmassene i området. For den nummeriske analysen er det brukt et Hoek & Brown bruddkriterium for bergmassen. Parametre for bruddkriteriet er estimert ut fra bergmasseklassifiseringen etter *GSI*-verdier (*Geological Strength Index*).

De svakeste delene av bergmassen er vurdert å klassifisere i området GSI (*Geological Strength Index*) 40 til 50. Enakset trykkfasthet er antatt å ligge rundt 100 MPa. I tabellen under er det satt opp korresponderende bruddparametre for bergmasse med GSI 40 og 50:

| | Normalt berg | Svakere berg |
|---|---|---|
| *GSI* | 50 | 40 |
| $\sigma_c$ [MPa] | 100 | 100 |
| $m_i$ | 19 | 19 |
| $\gamma$ [MN/m$^3$] | 0,027 | 0,027 |
| E [GPa] | 10 | 5,6 |
| $\nu$ | 0,2 | 0,2 |
| $m_b$ | 3,19 | 2,23 |
| $m_{b\text{-residual}}$ | 1,59 | 1,11 |
| s | 0,0039 | 0,0013 |
| $s_{residual}$ | 0,0019 | 0,0006 |
| a | 0,5 | 0,5 |

Hensikten med analysene i denne rapporten er å vurdere hvorvidt spenningskonsentrasjoner, grunnet påvirkning av nærliggende fjellhaller, vil kunne føre til spenningsinduserte stabilitetsproblemer. For det videre arbeidet er det valgt å bruke de mest konservative parametrene, for å analysere aktuelle grensetilfeller. Det påpekes derfor at analysene ikke nødvendigvis er representative for alle deler av hallene.

### 3.2 Spenninger

Prosjektområdet ligger i en åsrygg/kolle sørøst for Sognsvann. Bergarten i området er en hornfels, av middels og god kvalitet.

Spenningene i berggrunnen kan lokalt variere mye, både i størrelser og retninger. Målinger av spenningene i et prosjektområde er vanligvis ikke tilgjengelige. Størrelsen og retningen på disse må derfor antas på bakgrunn av erfaringer fra tilsvarende område, topografiske og geologiske forhold.

Generelt er de horisontale hovedspenningene i Oslofeltets bergarter orientert tilnærmet N-S og Ø-V, og den største av disse er vanligvis Ø-V. Siden åsryggen i prosjektområdet er orientert N-S, er det grunn til å tro at Ø-V spenningene vil være delvis avskjermet av Sognsvannet/Maridalsvannet og at N-S spenningene dermed vil være like store eller større enn disse. Den tredje hovedspenningen vil normalt være vertikalt, og lik vekten av de overliggende massene.

Det er sett på et typisk tverrsnitt av hallene, i den delen der overdekningen er størst. Det er ikke tatt hensyn til tverrtunneler, adkomsttunneler, eller andre konstruksjoner i nærheten. For de analytiske beregningene er det valgt et representativt nivå ca midt i hall "D". Spenningsnivå for den analytiske modellen er hentet ut fra den numeriske modellen, med en *k*-faktor på 1,0. Det er i tillegg utført en sensitivitetsstudie hvor de horisontale spenningene er variert fra 0,25 til 1,5 ganger den vertikale spenningen.

## 4 ANALYTISK SPENNINGSBEREGNING

En analytisk beregning er utført for spenningsfordelingen rundt et sirkulært tverrsnitt.

For sirkulært tverrsnitt er det benyttet Kirsch' formler, gitt i likning (*1*) og (*2*) under. Formlene beregner radiell spenning, $\sigma_r$, og tangentiell spenning $\sigma_\theta$, i et gitt punkt med radius, *r*, fra åpningens sentrum. På tverrsnittets kontur vil det oppstå en høy tangentialspenning, mens den radielle spenningen vil være lik 0. Lenger ut fra åpningen vil spenningene gå mot den initielle spenningstilstanden i bergmassen. I et punkt som ligger ca 15 m fra åpningen (ved kontur til planlagt ny hall) vil effekten av åpningen på den initielle spenningstilstanden være redusert til ca 20 %.

I denne analysen er det benyttet et sirkulært tverrsnitt med radius lik halvparten av spennet i hallen (dvs $a$ = 8,8 m). Spenningsnivå for den analytiske modellen er hentet ut fra den numeriske modellen, med en *k*-faktor på 1,0. Grunnet topografiske forhold er horisontalspenningene noe lavere enn den vertikale. Utgangspunktet for den analytiske bergningen er da følgende:

$\sigma_v$ = 0,70 MPa.
$\sigma_h$ = 0,62 MPa

På Figur 2 (i kapittel 6.1) er det vist en beregnet spenningsfordeling langs en horisontal akse ut fra en sirkulær åpning (blå kurve). *Figuren viser også spenningsfordeling fra nummerisk modellering av virkelig hallgeometri (rød kurve), omtalt i kapittel* 5.

$$(1) \qquad \sigma_r = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cdot \cos 2\theta$$

$$(2) \qquad \sigma_\theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cdot \cos 2\theta$$

Der:
$a$ = radius til bergrommets åpning

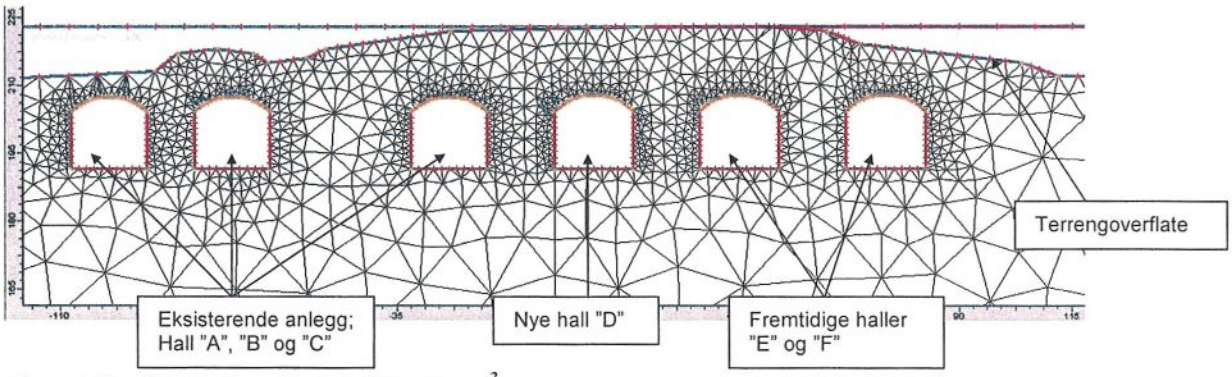
$r$ = radius til målepunkt (fra senter av bergrommet)
$\theta$ = vinkel til måleretning fra horisontalen
(Videre er $\sigma_1$ og $\sigma_2$ definert som henholdsvis vertikal og horisontal spenning)

Dersom det plasseres en ny åpning ved siden av den første, vil en tilsvarende konsentrasjon av tangentiell spenning og reduksjon av radiell spenning forekomme. Teoretisk samvirke av de 2 åpningene, er illustrert ved en forenklet antakelse om superposisjonering av spenningene, vist i Figur 3 (kapittel 6.2), (blå kurver).

## 5 NUMMERISK SPENNINGSANALYSE

Hallene er modellert ved hjelp av det 2-dimensjonale endelig element programmet *Phase*$^2$.

Modellen er laget i et typisk tverrsnitt av hallene, i den delen der overdekningen er størst. Det er ikke tatt hensyn til tverrtunneler, adkomsttunneler, eller andre konstruksjoner i nærheten. Et utsnitt av elementmodellen er vist på Figur 1 under. (*Merk; Hall "A" og "B" er tatt med i modellen, men har ingen betydning for resultatene av analysene i denne rapporten*).




**Figur 1 Utsnitt av elementmodell fra *Phase*$^2$.**

Det er utført analyser for bergmassekvalitet som beskrevet i kapittel 3.1. Videre er det utført en sensitivitetsanalyse for spenninger, som beskrevet i kapittel 3.2. Denne analysen viser at størrelsen på de horisontale spenningene kan ha stor betydning for hengen av hallene, men vil ha mindre innvirkning på situasjonen i stabben mellom hallene.

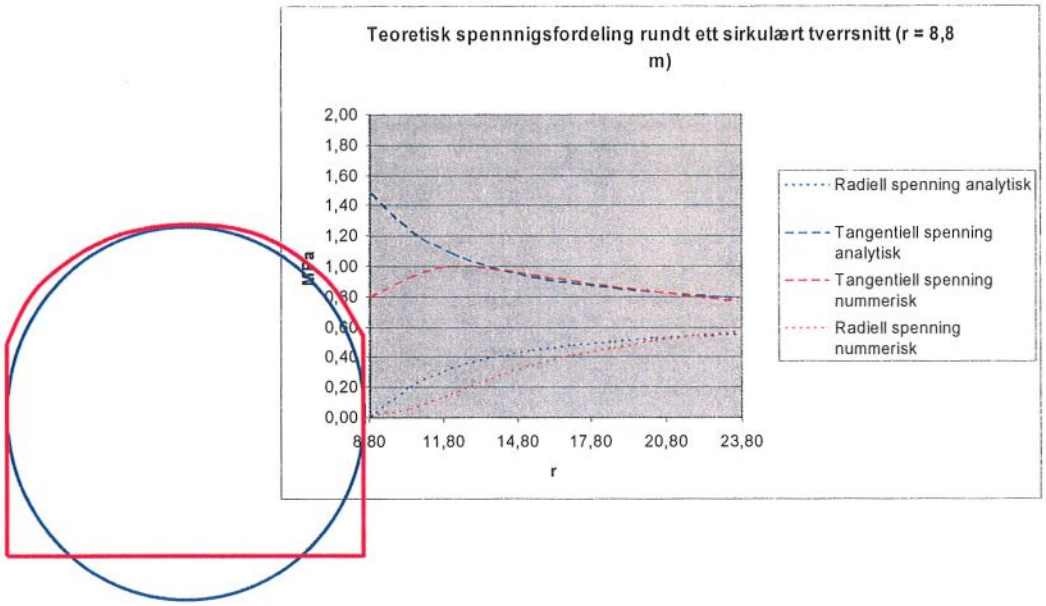
## 6 RESULTATER FRA ANALYSER

### 6.1 Spenningsfordeling rundt én åpning

Figur 2 under viser en grafisk fremstilling av tangentiell og radiell spenning langs en horisontal linje fra sideveggen av en åpning i bergrommet. Initialspenningen i det analytiske tilfellet er som angitt kapittel 4, og for den numeriske analysen er spenningene gravitative, med en $k$-faktor på 1,0. Forholdene er tilnærmet upåvirket av åpningen når en betrakter spenningene mer enn 1 "hall-diameter" fra åpningen.

De blå kurvene viser spenningene fra en analytisk beregning rundt et sirkulært tverrsnitt, mens de røde kurvene er data hentet fra den nummeriske analysen av virkelig geometri.

I den numeriske analysen viser tangentialspenningen en "spenningsvoll", der spenningene er lavere nærmest konturen, for så å stige til et maksimum 2-3 m utenfor. Dette fenomenet skyldes at berget i de rette veggene utsettes for skjærbrudd og deformasjon, som fører til en avspenning av bergmassen nærmest konturen.

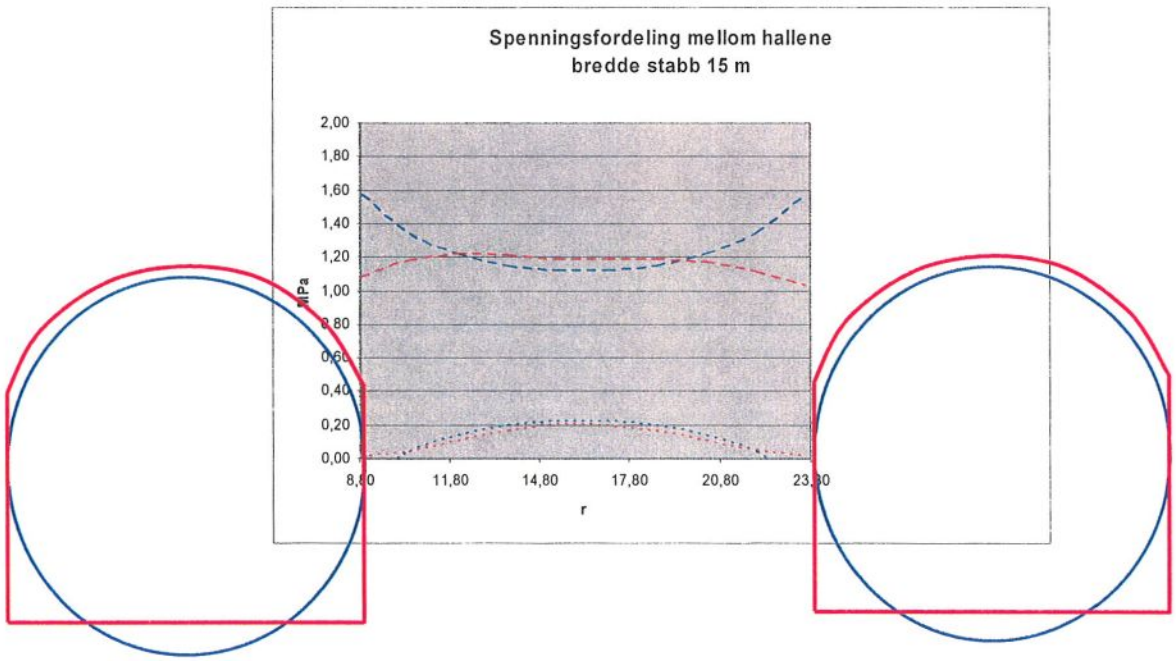



**Figur 2 Spenningsfordeling rundt <u>én</u> sirkulær åpning, fra numerisk og analytisk analyse.**

## 6.2 Spenningsfordeling rundt to åpninger

I de etterfølgende figurene er påvirkningen av 2 bergrom ved siden av hverandre vist. For de analytiske beregningene er spenningene fra de 2 hallene summert ved superposisjonering, (de blå kurvene). Data fra den nummeriske analysen er vist i de røde kurvene.

På samme måte som i beregningene for én åpning, viser også disse en "spenningsvoll" nærmest konturen. Forklaringen til dette er den samme som beskrevet i foregående kapittel (6.1).

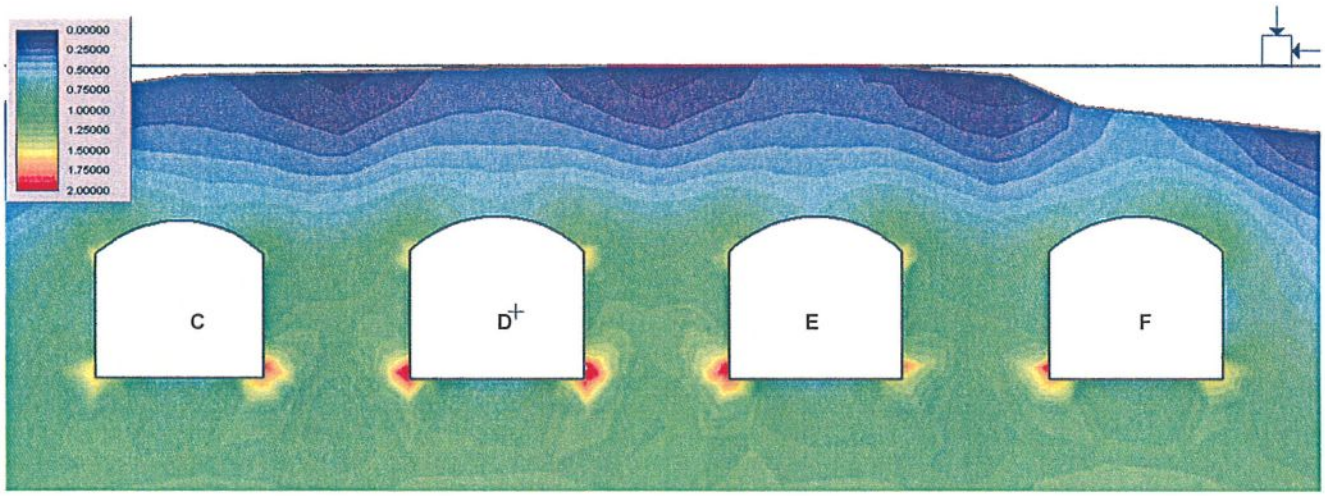



**Figur 3 Spenningsfordeling i stabben mellom hallene (fra numerisk og analytisk analyse).**

### 6.3 Evaluering av resultater fra nummerisk analyse

I det etterfølgende, er det vist hvordan spenningsnivået rundt bergåpningene utvikler seg når det modelleres nye bergåpninger ved siden av de eksisterende.

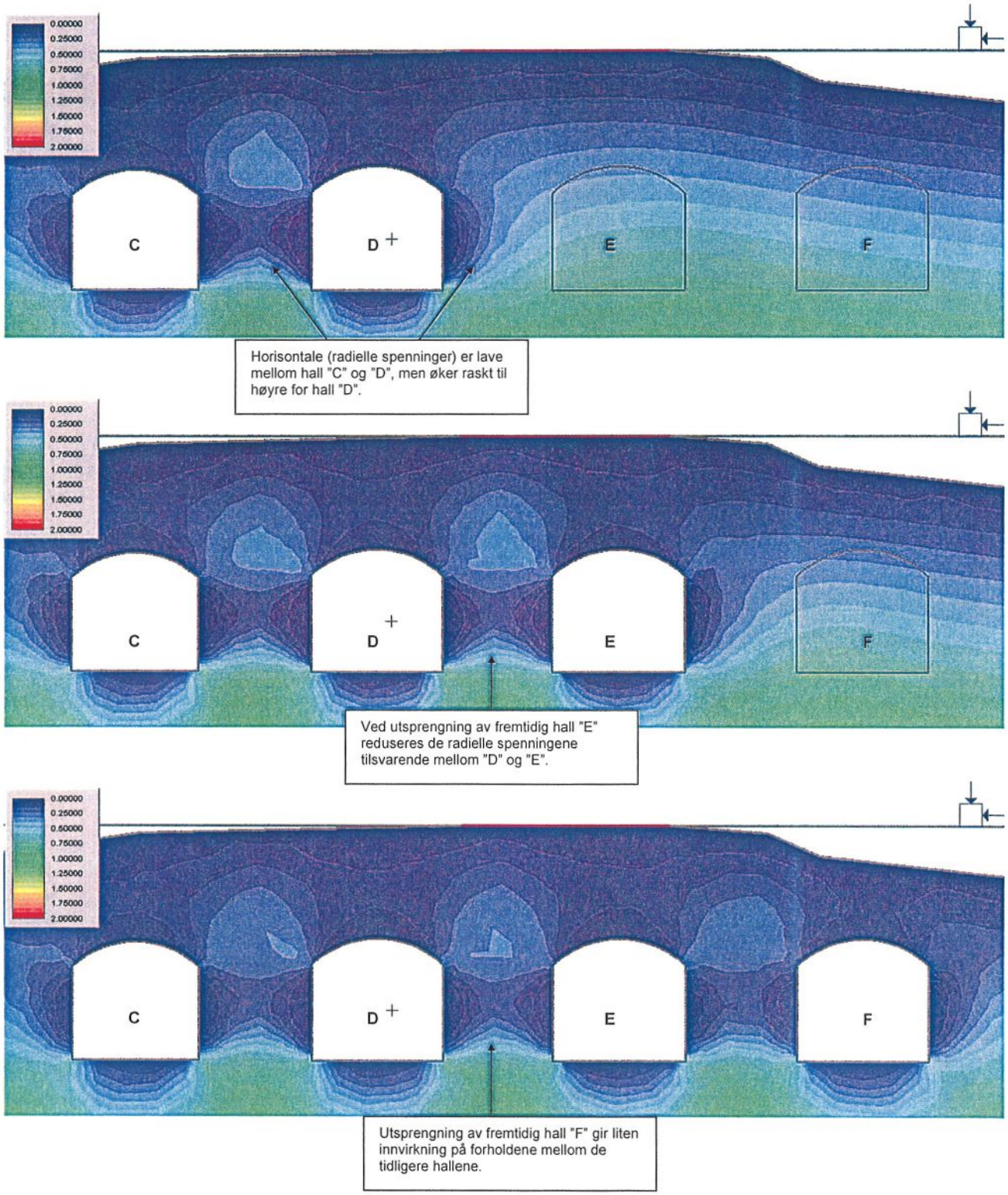
Figur 4 viser et plott av største hovedspenning ved *k*-faktor 1,0, når alle planlagte haller er utsprengt.



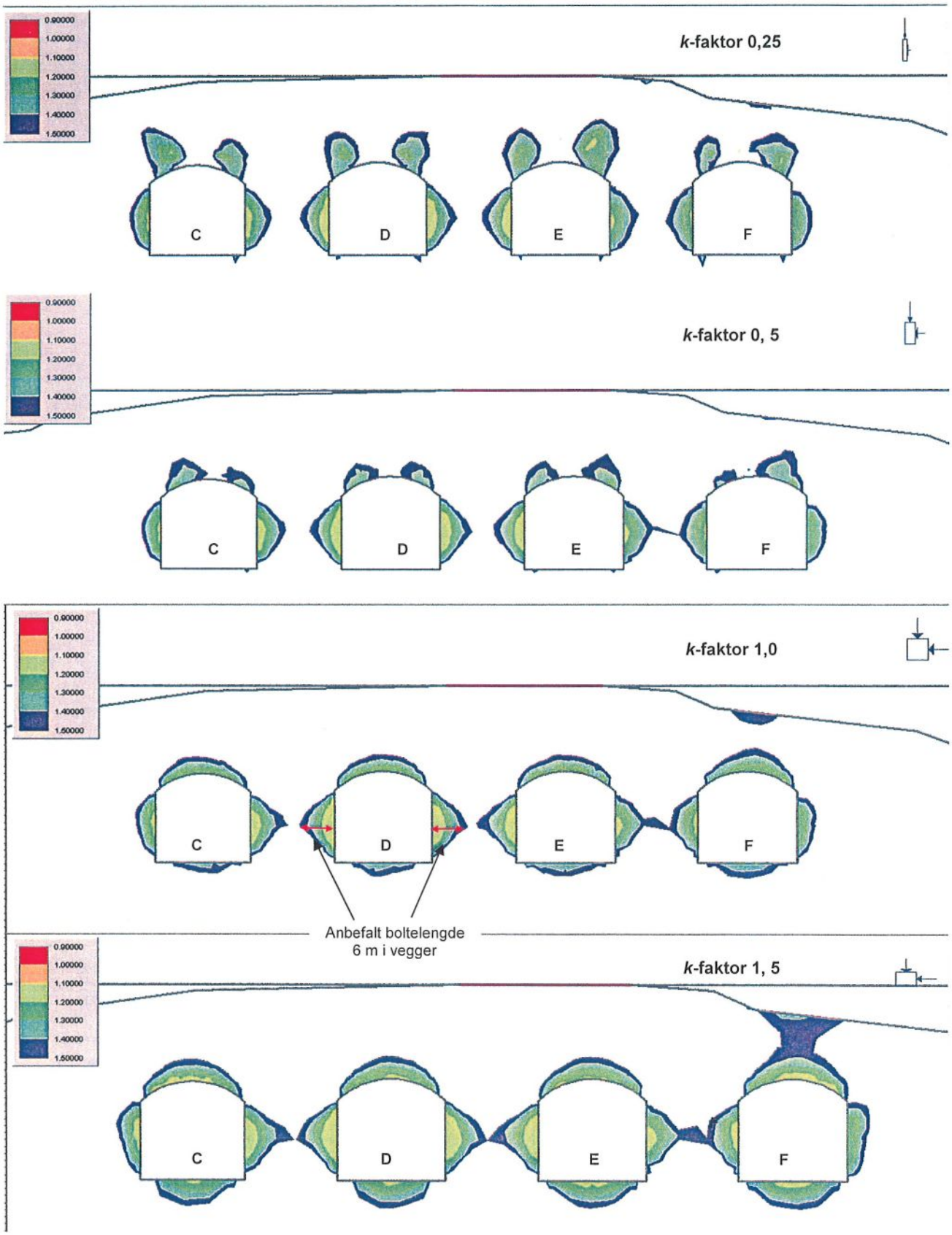

**Figur 4 Største hovedspenning, $\sigma_1$, (resultater fra modell med *k*-faktor = 1,0).**

Figur 5 viser utviklingen av minste hovedspenning ved utsprengning av nye haller. Analysene viser tydelig at etablering av en ny åpning rett ved siden av en eksisterende har stor innvirkning på den første hallen. Videre er det derimot liten eller ingen påvirkning på de eksisterende hallene ved ytterligere bergåpninger lenger bort.

Figur 6 viser plott fra analysene av sikkerhetsfaktor mot plastisk brudd i bergmassen (basert på Hoek & Brown bruddkriterium), for 4 forskjellige *k*-verdier. Konturene går fra sikkerhetsfaktor 0,9 til 1,5. Normalt anbefales boltelengder rundt bergåpninger lange nok til at det sikres god forankring i stabilt berg. For en analyse som denne vurderes berget med sikkerhetsfaktor > 1,4 å tilfredsstille dette. Veiledende boltelengde anbefales dermed å nå ut til det blå feltet i denne analysen, som gir ca 6 m lengde. Videre indikerer analysene av sikkerhetsfaktor at berget i hengen kan bli ustabilt ved lav *k*-faktor (lav horisontalspenninger). Dette indikerer et mulig behov for noe lengre bolter enn normalt forventet, også i hengen.




**Figur 5 Utvikling av minste hovedspenning, $\sigma_3$, ved utsprengning av hall "D", "E" og "F" (resultater fra modell med *k*-faktor = 1,0).**




**Figur 6 Sikkerhetsfaktor mot brudd (konturer fra 0,9 til 1,5), (resultater fra modell med *k*-faktor (fra toppen): 0,25, 0,5, 1,0 & 1,5).**

# 7 KONKLUSJON / ANBEFALTE TILTAK

Analysene av spenninger i stabben mellom hallene illustrerer hvordan hallene gjensidige påvirker hverandre. De analytiske beregningene bekrefter spenningstilstanden i de numeriske.

De forutsatte bergmekaniske parametrene og spenningstilstanden i denne evalueringen vurderes å være konservative, og det er ikke forventet at det skal opptre større områder med vesentlig dårligere kvalitet enn det som er brukt for analysene i denne rapporten. Ut fra en ren spenningsanalyse vurderes en avstand mellom hallene på ca 15 m å være uproblematisk, og spenningsinduserte belastninger synes håndterbare med konvensjonell sikring.

Med hensyn til belastning i veggene, viser analysene at stabbene mellom hallene får en ekstra belastning av nabohallen, men blir ikke betydelig belastet av ytterligere haller lenger unna.

- **Forutsatt bergmassekvalitet som benyttet i denne analysen anbefales 6 meter boltelengde i veggene i hall "D".**

Uten påvirking fra nabohall vil boltelengden i østveggen kunne reduseres noe (til ca 4 m), men med planer om utvidelse med nye haller blir dette trolig for lite.

Analysene med forskjellig *k*-faktor viser to trender:

- Ved høyere horisontalspenninger øker den totale belastningen rundt hallene noe, men samtidig blir spenningene mer homogene, og faren for manglende innspenning i hengen reduseres.
- Ved lavere horisontalspenninger øker faren for manglende innspenning i hengen (med eventuelt påfølgende fare for blokkutfall).

Spesielle kommentarer:

- Analysene i denne rapporten omhandler kun stabilitetsproblemer som resultat av spenningskonsentrasjoner. For et anlegg av denne typen med lav overdekning, vil det sannsynligvis opptre tilfeller der manglende innspenning gir mulighet for blokkutfall. Det forutsettes at slike blokkutfall håndteres på stedet, med sprøytebetong og boltesikring med de nødvendige kapasiteter og lengder. Manglende innspenning i vederlag/heng i denne analysen indikerer behov for relativ tung og systematisk sikring i hengen.
- I hall C er det brukt 4 og 6 m lange bolter i veggene. Det anbefales at stabiliteten av hall "C" overvåkes under driving av hall "D". Om uregelmessigheter observeres må sikringen i hall "C" vurderes supplert.
- Forhold nevnt i denne rapporten bør følges spesielt opp av ingeniørgeolog under driving av hall "D".