

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING  
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH

# **SEISMICITET VID BRYTNING PÅ STORA DJUP**

**Seismicity induced by mining  
at great depths**

Kristina Larsson, LTU

SveBeFo Rapport 71

Stockholm 2005

ISSN 1104 - 1773

ISRN SVEBEFO-R--71--SE



## FÖRORD

Ökande brytningsdjup i svenska gruvor innebär allt högre bergspänningar och därmed ett ökande behov av att kontrollera stabilitetsförhållandena. Vid sidan av storskaliga stabilitetsproblem kan det förekomma i spröda bergarter med hög hållfasthet att man får plötsliga brott, så kallat smällberg. Dessa brott är oftast lokalt begränsade till vägg- eller takpartier i en enskild ort. En viss ökning av smällbergsfenomen har uppmärksammats på senare tid i LKAB:s och Bolidens gruvor och ett förslag till forskningsprojekt formulerades 2002 vid LTU i samråd med gruvföretagen och SveBeFo. För att ta tillvara erfarenheter från länder med likartad verksamhet på större djup föreslogs att projektet skulle baseras på en ingående inventering, främst vid gruvor i Kanada men även studier och information från några andra håll, och därefter följas av en jämförelse med erfarenheterna i svenska gruvor. Det beslöts att projektet skulle genomföras som ett licentiatarbete vid LTU och som del av SveBeFos forskningsprogram FP 2000 med delfinansiering från Boliden Mineral och LKAB.

Föreliggande SveBeFo-rapport sammanfattar de viktigaste delarna av licentiatavhandlingen ”Mining induced seismicity in Sweden”, som presenterades av Kristina Larsson vid LTU i december 2004. Projektet har följts av och fått stöd av en referensgrupp bestående av Per-Ivar Marklund, Boliden Mineral, Christer Andersson, SKB, Lars Malmgren, LKAB, Arne Myrvang, NTNU, Jonny Sjöberg, SwedPower, samt handledaren Erling Nordlund, LTU, och undertecknad.

Stockholm i april 2005

*Tomas Franzén*

## **SAMMANFATTNING**

Gruvbrytning stör det primära spänningstillståndet i bergmassan, vilket leder till lokalt förändrade spänningar. Bergmassan i Sverige består generellt av höghållfasta spröda bergarter, så risken för seismicitet och smällberg (våldsamma brottförlopp) ökar med ökande brytningsdjup på grund av de högre spänningarna. Seismicitet är bergmassans respons på deformation och brott. En seismisk händelse är en plötslig frigörelse av potentiell eller lagrad energi i berget, vilken avges i form av seismiska vågor. Smällberg definieras som en seismisk händelse som orsakar en skada (utfall) på öppningar i bergmassan.

De viktigaste faktorerna som påverkar förekomsten av seismicitet är det primära spänningstillståndet, bergets egenskaper samt brytningsmetodens påverkan på spänningsfältet. De svenska igensättningsgruvorna är jämförbara med de kanadensiska vad gäller spänningstillstånd och bergets egenskaper, så samma typer av seismicitetsproblem kan förväntas med ökande brytningsdjup. De svenska skivrasgruvorna kan däremot inte jämföras med de studerade skivpallgruvorna vad gäller det primära spänningstillståndet och påverkan från brytningsmetoden. Skivrasbrytning påverkar primärspänningarna över en större area än skivpallbrytning, vilket betyder att huvudspänningarna runt en liggväggsort är lika höga eller högre på samma djup. Detta får till följd att en seismisk händelse av en viss magnitud som inträffar på 2000 m djup i en kanadensisk skivpallgruva, kan förväntas på ett betydligt mindre djup i en skivrasgruva, förutsatt att bergets egenskaper är desamma.

Skador orsakade av seismicitet i de svenska gruvorna idag har en begränsad omfattning, och kan kontrolleras med nuvarande styva förstärkning. När händelserna ökar i styrka, måste förstärkningen kompletteras med mer eftergivliga och energiabsorberande element. Användning av dessa typer av förstärkning samt användning av avlastning i utländska gruvor bör studeras och utvärderas för svenska förhållanden.

För att rätt förstärkning ska kunna användas i seismiskt aktiva områden krävs det att dessa områden kan identifieras innan seismiska händelser börjar förekomma. Detta kan ske genom att kombinera en geomekanisk modell av gruvan med spännings- och energi-modelleringar i 3D av en föreslagen brytningssekvens. Den geomekaniska modellen bör innehålla geologiska strukturer, egenskaper för olika bergarter samt var de finns, skadekarteringar samt bergmasseklassificeringar. Syftet med modellen skulle vara att öka förståelsen för bergmassans beteende, att identifiera områden med ökad seismisk risk, samt att säkerställa att rätt förstärkning används på rätt plats. I de gruvor där en sådan modell redan finns borde den utökas till att koppla samman geologi med seismiska händelser samt med elastiska spänningsanalyser i både liten och stor skala.

Ett seismiskt övervakningssystem är en investering värd att begrunda för gruvor som har seismicitet, både för att lokalisera och magnitudbestämma seismiska händelser, men också för att övervaka bergmassans beteende under brytning. Detta kan ge värdefulla indata till bland annat brytningsplanering.

## SUMMARY

The virgin stress state in the rock mass is disturbed by mining, which leads to locally increased or decreased stresses. The rock mass in Sweden is generally composed of high strength brittle rock types, so the risk of seismicity and rockbursts (violent failures) increase with increasing depth of mining due to increasing stress levels. Seismicity is the rock mass response to deformation and failure. A seismic event is the sudden release of potential or stored energy in the rock. The released energy is then radiated as seismic waves. A rockburst is defined as a mining induced seismic event that causes damage to openings in the rock.

The most important factors influencing the occurrence and intensity of seismicity are virgin stress state, rock properties, and the influence of the mining method on the stress field. The Swedish cut-and-fill mines are comparable to the studied Canadian mines regarding stress state, mining method, and rock properties, so the same seismicity problems should be expected as mining depth increases. The Swedish sublevel caving mines are not comparable to the studied open stoping mines, regarding stress state and the influence of mining on the stress field. The sublevel caving mining method influences the virgin stress state over a larger area than open stoping methods, which means that the principal stresses around footwall drifts are of the same order or higher at the same depth. This means that seismic events of certain magnitude that are experienced at a depth of 2000 m in Canadian mines, can be expected to occur at less depth in the sublevel caving mines.

At present the damage caused by seismicity is limited and can be controlled with the standard stiff reinforcement. When the events become larger, the reinforcement must be complemented with more yielding and energy absorbing components. Practices regarding energy absorbing reinforcement and destressing of drifts should be studied and evaluated for application in the Swedish mines.

The application of the correct reinforcement in seismic areas requires that these areas can be identified before seismicity start to occur. This identification can be accomplished by combining a geomechanical model of the mine with 3D stress and energy modeling of the proposed mining sequence. The geomechanical model should include geological structures, properties and locations of different rock types, failure mappings, and rock mass classification. The purpose of the model would be to increase the understanding of the behavior of the rock mass, and to identify areas of high seismic hazard. In the mines where a model already exists, the model should be developed further, to connect geology with seismic events, and to elastic stress analysis on both small and large scale.

A seismic monitoring system is an investment worth considering for mines experiencing seismicity, both for localization and estimation of magnitude of seismic events, but also to monitor the behavior of the rock mass during mining. This can provide valuable input for production planning, sequencing etc.

## SYMBOLER OCH FÖRKORTNINGAR

$\sigma_v, \sigma_z$	= vertikalspänning, tryckspänningar tagna som positiva
$\sigma_H$	= största horisontalspänning
$\sigma_h$	= minsta horisontalspänning
$\sigma_1$	= största huvudspänning
$\sigma_2$	= intermediär huvudspänning
$\sigma_3$	= minsta huvudspänning
$\sigma_n$	= normalspänning till t.ex. geologisk struktur
$\tau$	= skjuvspänning
$g$	= tyngdkraftsacceleration, $m/s^2$
$z$	= djup under markytan, m
$\nu$	= Poisson tal
$E$	= elasticitetsmodul
$G$	= skjuvmodul
$V$	= volym
$W_k$	= kinetisk eller seismisk energi
$W_r$	= frigjord energi
$U_m$	= energi lagrad i den utbrutna volymen
$U_s$	= energi lagrad i fjäder
$K$	= styvhet i fjäder eller omgivande berg
$F$	= kraft, N
$N$	= normalkraft verkande vinkelrätt mot studerad yta
$\mu_s$	= statisk friktionskoefficient
$\mu_d$	= dynamisk friktionskoefficient
$A$	= area
$s$	= hastighet
$D$	= genomsnittlig skjuvförskjutning
$d$	= avstånd
$A_0$	= amplitud
$A$	= maximal amplitud
$\Delta$	= fokaldjup
$T$	= uppmätta vågens period



$h$	= avstånd, räckvidd
$\varphi$	= epicentriskt avstånd, °
$E$	= epicentriskt avstånd i kilometer
$I$	= förstärkningsfaktor för instrument
$M_L$	= lokal eller Richter magnitud
$M_0$	= seismiskt moment
$M_S$	= ytvågsmagnitud
$m_b$	= volymsvågsmagnitud
$M_w$	= momentmagnitud
$M_n$	= Nuttlimagnitud
$E_S, E_P$	= seismisk energi i S- respektive P-våg
$E_t$	= total seismisk energi
$N$	= antal händelser
$a$	= konstant
$b$	= förhållande mellan små och stora händelser i ett visst tids intervall
$ERR$	= Energy Release Rate
$ESS$	= Excess Shear Stress
$VESS$	= Volume Excess Shear Stress
$MGW$	= Modeled Ground Work
$LERD$	= Local Energy Release Density
$SHS$	= Seismic Hazard Scale



## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sammanfattning.....	iii
Summary.....	v
Symboler och förkortningar.....	vii
Innehållsförteckning.....	ix
1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Projektets mål och omfattning.....	2
1.3 Rapportens upplägg.....	3
2 Spänningar och bergmassans beteende.....	5
2.1 Spänningstillståndet i bergmassan.....	5
2.2 Spänningar i Skandinavien.....	6
2.3 Brytningsinducerade spänningar.....	6
2.4 Bergmassans respons på energiförändringar.....	10
3 Seismicitet – generell beskrivning.....	13
3.1 Tryckspänningar och seismicitet.....	13
3.2 Skjuvspänningar och seismicitet.....	15
3.3 Seismiska händelser knutna till hålrum.....	18
3.4 Seismiska händelser knutna till geologiska diskontinuiteter.....	18
4 Seismicitet – brytningsrelaterad.....	21
4.1 Seismicitet och jordbävningseismologi.....	22
4.1.1 Förkastningar och seismiska vågor.....	22
4.1.2 Seismiskt moment och momenttensor.....	23
4.1.3 Jordbävningars magnitud.....	26
4.1.4 Seismisk energi.....	29
4.2 Seismisk övervakning.....	30
4.3 Att förebygga och kontrollera seismicitet.....	32
4.3.1 Introduktion.....	32
4.3.2 Avlastning.....	33
4.3.3 Förstärkning.....	35

5	Fallstudier: utländska gruvor .....	39
5.1	Spänningstillstånd.....	39
5.2	Brytningsmetod .....	40
5.3	Geologi och bergets egenskaper .....	41
5.4	Avlastnings- och förstärkningsmetodik.....	42
5.5	Erfarenheter av smällberg och seismisk övervakning .....	43
6	Jämförelse och utvärdering av fallstudier.....	47
6.1	Spänningstillstånd.....	47
6.2	Brytningsmetod .....	49
6.2.1	Igensättningsbrytning .....	49
6.2.2	Skivpallbrytning .....	51
6.2.3	Skivrasbrytning.....	52
6.2.4	Jämförelse mellan skivpall- och skivrasbrytning .....	56
6.3	Geologi och bergets egenskaper .....	57
6.4	Förstärknings- och avlastningsmetodik.....	58
6.4.1	Förstärkningsmetodik .....	58
6.4.2	Avlastningsmetodik .....	59
6.5	Erfarenheter av smällberg och seismisk övervakning .....	60
6.5.1	Erfarenheter av smällberg.....	61
6.5.2	Seismisk övervakning.....	64
6.6	Utvärdering av metoder för att föutsäga seismicitet.....	65
6.7	Sammanfattning av jämförelse .....	68
7	Slutsatser och Rekommendationer .....	71
7.1	Slutsatser.....	71
7.2	Rekommendationer.....	72
8	Erkännanden .....	75
9	Referenser.....	77

# 1 INLEDNING

## 1.1 Bakgrund

Det primära spänningstillståndet i jordskorpan beror av faktorer som gravitation och tektonik. I närheten av en gruva störs spänningstillståndet av brytningen, vilket ger lokalt ökade eller minskade spänningar. Omfattningen och konsekvenserna av brott i berget styrs av tre huvudfaktorer: geomekaniska förhållanden, spänningstillståndet och brytningen. De geomekaniska förhållandena omfattar intakt berg med geologiska strukturer (sprickor, förkastningar, veck etc.) och karaktäriseras av det intakta bergets och sprickornas hållfasthet och styvhet, vattentryck etc. Olika kombinationer av faktorer ger olika typer av brott. Om bergmassan består av bergarter med låg hållfasthet samt många sprickor, kan höga spänningsnivåer leda till omfattande brott i bergmassan samt stora plastiska deformationer. Om bergmassan består av spröda bergarter med hög hållfasthet, ökar risken för våldsamma brottförlopp. Dessa brott kan vara begränsade till omgivningen närmast öppningen eller resultera i rörelser längs förkastningar vilket kan leda till jordbävningssliknande fenomen. Glidning längs en förkastning frigör stora mängder energi, vilket kan skada underjordskonstruktioner. Våldsamma brottförlopp kan orsaka produktionsstopp, kollaps av orter och brytningsrum, och utgör en säkerhetsrisk för personalen. Vid arbete nära gaveln är man mycket utsatt om bergfragment börjar kastas ut från gaveln eller taket. Dessa typer av brott kan ibland föregås av knäppande ljud, men dessa förekommer inte alltid. Knäppningar kan också förekomma utan att bergfragment kastas ut, så risken för skador är svår att bedöma.

Det ökande brytningsdjupet i svenska underjordsgruvor leder till ökade spänningsnivåer och därför till en ökad risk för instabilitet i orter, ramper, schakt och andra underjordskonstruktioner. Den höga bergkvalitén i de områden som bryts idag, i kombination med ökande spänningar, kommer troligen att leda till att antalet våldsamma brottförlopp ökar. Troligen kommer omfattningen av dessa brott samt utfallsvolymer att öka i framtiden.

Under de senaste åren har ett ökande antal våldsamma brottförlopp som orsakat stabilitetsproblem inträffat i både LKABs och Bolidens gruvor i Sverige. Trots till synes liknande förhållanden varierar de spröda och våldsamma brotten i intensitet och omfattning mellan olika platser. Detta projekt initierades för att uppskatta problemets omfattning, och för att finna den gemensamma mekanismen bakom de våldsamma brottförloppen.

Dessa typer av brott kallas generellt för smällberg. Denna term används utan egentlig definition, så vad som kallas smällberg i en gruva, behöver inte kallas så i en annan. På grund av detta introduceras här termerna seismicitet och seismisk händelse. **Seismicitet** är bergmassans respons på deformation och brott. En **seismisk händelse (seismic event)** är den plötsliga frigörelsen av potentiell eller lagrad energi i berget. Den frigjorda energin avges sedan som seismiska vågor. **Smällberg (rockburst)** definieras som en brytningsinducerad seismisk händelse som orsakar skada på hålrum i berget. Dessa definitioner har använts av bland annat Cook (1976), Salamon (1983) samt Ort-lepp och Stacey (1994). Termen smällberg är relativt vag, eftersom definitionen inte anger hur stor skadan ska vara. En händelse som kastar ut 1 kg berg, och en som får en hel ort att kollapsa är båda smällbergshändelser.

## 1.2 Projektets mål och omfattning

Ett av målen med projektet var att sammanfatta förekomsten, den nuvarande kunskapsnivån och erfarenheter av seismicitet och smällberg i gruvor baserat på en litteraturstudie och fallstudier från gruvor utanför Sverige. Ett annat mål var att kunna förutsäga utvecklingen i de svenska gruvorna, samt att klargöra skillnader i beteende mellan de svenska och utländska gruvorna beträffande

- spänningsförhållanden,
- brytningsmetoder,
- brottmekanismer, och
- orters och brytningsrums tvärsnitt.

Denna rapport är en svensk sammanfattning av projektets resultat som finns utförligare beskrivet i en litteraturreport (Larsson, 2004a) samt en licentiatavhandling (Larsson, 2004b). Huvudsyftet med denna rapport är att ge en överblick över de faktorer som bidrar till seismicitet samt olika metoder för att kontrollera seismicitet, förklara några av de vanligast förekommande termerna i litteraturen, en beskrivning av förekomsten av seismicitet och rutiner för hur man handskas med seismicitet och smällberg i det dagliga arbetet i gruvor utanför Sverige, samt omfattningen av problemet i de svenska gruvorna. Valet av utländska gruvor gjordes främst utifrån att de hade känd erfarenhet av seismicitet. Andra kriterier var brytningsmetoder som är jämförbara med de svenska, spänningförhållanden och geomekaniska förhållanden liknande de i Skandinavien, och ett brytningsdjup lika stort eller större än de svenska gruvornas.

### **1.3 Rapportens upplägg**

Efter detta inledande kapitel följer en kort litteraturstudie bestående av Kapitel 2, 3 och 4. Kapitel 2 innehåller en kort beskrivning av spänningar och bergmassans beteende. Det generella spänningstillståndet i Skandinavien samt hur de två vanligaste svenska brytningsmetoderna påverkar spänningarna beskrivs. Kapitel 3 är en generell beskrivning av seismicitet, vilket inkluderar sambandet mellan spänningstillståndet och seismicitet, de olika typerna av seismiska händelser, samt några seismologiska termer som är vanligt förekommande i litteraturen. Kapitel 4 beskriver seismicitet kopplat till gruvbrytning, och inkluderar bland annat seismisk övervakning samt metoder att förhindra och kontrollera seismicitet.

Kapitel 5 sammanfattar de viktigaste erfarenheterna från de utländska fallen. Kapitel 6 är en jämförelse och utvärdering av de olika fallen, och en utvärdering av de metoder som finns för att förutsäga seismicitet. Kapitel 7 består av slutsatser och rekommendationer för framtida arbete.

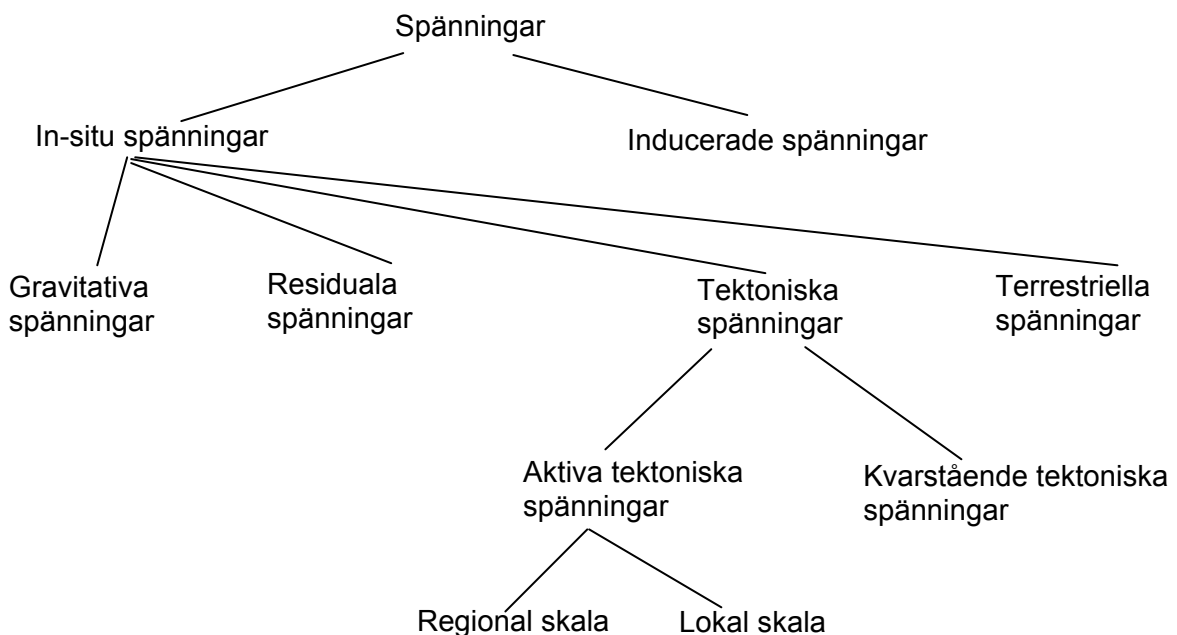




## 2 SPÄNNINGAR OCH BERGMASSANS BETEENDE

### 2.1 Spänningstillståndet i bergmassan

Kunskap om spänningstillståndet i bergmassan är viktigt för såväl infrastrukturprojekt, gruvor, oljeborrning, som för tillämpningar inom geologi och geofysik. Spänningar i bergmassan kan delas in i primära och sekundära spänningar (Amadei och Stephansson, 1997). Primärspänningar är de spänningar som existerar innan någon störning har inträffat, medan sekundära spänningar uppstår när de primära spänningarna omfördelas av en störning. En störning kan vara naturlig, t ex en förändring av förhållanden (uttorkning, svällning eller konsolidering), eller orsakas av mänsklig aktivitet (gruvbrytning, pumpning, eller energiutvinning) (Herget, 1988). Amadei and Stephansson (1997) har föreslagit en terminologi för spänningar, se Figur 2.1. Primärspänningarna omfattar gravitativa, tektoniska, residuala, och terrestriella spänningar. Terrestriella spänningar orsakas av dagliga och säsongsberoende variationer i temperatur, månens dragningskraft och Corioliseffekten (Amadei and Stephansson, 1997).



Figur 2.1. Spänningsterminologi (efter Amadei och Stephansson, 1997).

*Stress terminology (after Amadei and Stephansson, 1997).*

## 2.2 Spänningar i Skandinavien

Spänningstillståndet i Skandinavien uppvisar lokala skillnader. De horisontella huvudspänningarna har liknande magnituder, vilket är en observation som stöds av att flera olika typer av fokalmekanismer uppträder nära varandra. Medelorienteringen för största horisontella huvudspänningen i Skandinavien är  $N120^{\circ}E \pm 45^{\circ}$  (Müller et al., 1992). Denna spridning bekräftas av Stephansson (1993), som tillägger att på djup större än 300 m, så är största horisontalspänningen orienterad i NV-SV. Stephansson (1993) sammanställde data från spänningsmätningar med hydraulisk spräckning och fann att den största och minsta horisontella huvudspänningen varierade med djupet,  $z$ , enligt:

$$\sigma_H = 2.8 + 0.04z \quad [\text{MPa}] \quad 2-1a$$

$$\sigma_h = 2.2 + 0.024z \quad [\text{MPa}] \quad 2-1b$$

Stephansson (1993) sammanställde också resultat från alla spänningsmätningar med överborrning i Sverige och fann att den största, intermediära och minsta horisontella huvudspänningen varierade med djupet,  $z$ , enligt ( $z < 1000$  m):

$$\sigma_1 = 10.8 + 0.037z \quad [\text{MPa}] \quad 2-2a$$

$$\sigma_2 = 5.1 + 0.029z \quad [\text{MPa}] \quad 2-2b$$

$$\sigma_3 = 0.8 + 0.020z \quad [\text{MPa}] \quad 2-2c$$

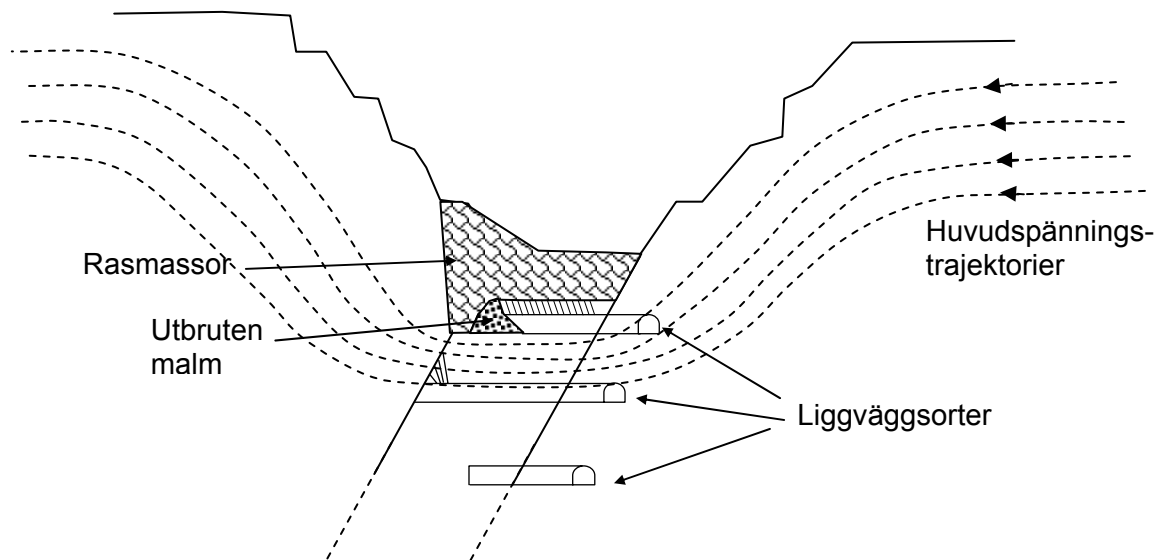
## 2.3 Brytningsinducerade spänningar

En gruva består av en mängd olika hålrum utspridda över ett större område, vilket innebär att spänningstillståndet kan vara stort i ett stort område i gruvans närhet. Den komplexa layouten i kombination med att gruvan växer med tiden gör att det kan vara svårt att bestämma sekundärspänningarna kring hålrummen och i bergmassan kring gruvan. När gruvan blir större ökar också den störda zonen. De brytningsinducerade spänningarna orsakas av att ortssystem växer i kombination med styvhetsförändringar, hängväggsbrott, pelarbrott, återfyllning av brytningsrum, påverkan från rasflöde etc. (Jeremic, 1987). Olika brytningsmetoder påverkar spänningarna på olika sätt. Effekten

av de två vanligaste brytningsmetoderna i Sverige, skivras- och igensättningsbrytning beskrivs nedan.

### **Skivrasbrytning**

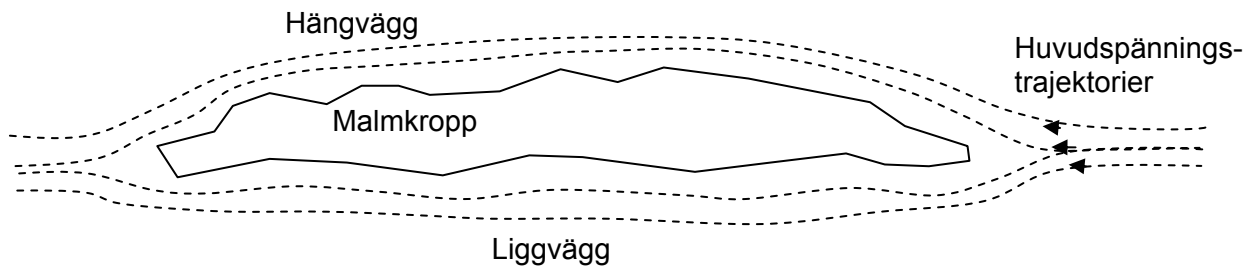
Skivrasbrytning är en storskalig metod som huvudsakligen används i stora, relativt brantstupande ( $\geq 60^\circ$ ) malmkroppar. Malmen lastas ut på nivåer som tillreds på regelbundna avstånd i malmen. Hängväggen spricker upp och kollapsar, vilket innebär att sättningar på markytan måste tillåtas. Endast en försumbar del av spänningarna går igenom rasmassorna på grund av dess låga styvhet jämfört med omkringliggande bergmassa. Största delen av normalspänningen vinkelrätt mot malmkroppen omfördelas ner under raset, se Figur 2.2.



Figur 2.2. Schematisk bild av spänningsomfördelningen under raset.

*Schematic figure of the stress redistribution under the caved zone.*

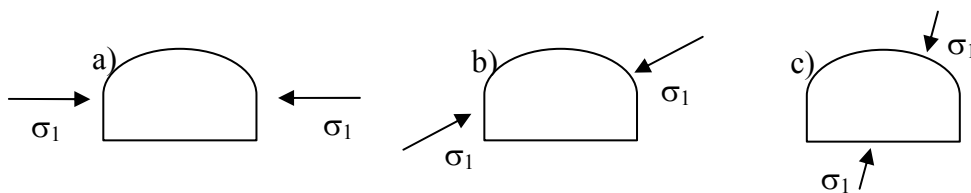
Ju djupare gruvan är desto högre blir spänningskoncentrationen i botten. Spänningen vinkelrätt mot malmkroppen blir, i schaktläget, högst ca 50-100 m under rasets botten (Sjöberg et al., 2001), vilket innebär att orter parallellt med malmkroppen (liggväggsorter) blir högt belastade. Spänningen parallellt med malmen omfördelas delvis under raset, men största delen omfördelas horisontellt till ligg- och hängvägg, se Figur 2.3. Denna spänningsomfördelning påverkar i första hand tvärorter och andra orter vinkelrätt mot malmen.



Figur 2.3. Schematisk bild av spänningsomfördelningen runt malmkroppen.

*Schematic figure of the stress redistribution around the orebody.*

Som ett exempel på spänningsomfördelningen under raset beskrivs förhållandena för en liggväggsort på tillredningsnivån. När orten drivs utsätts den i princip för de primära spänningarna i området, både beträffande största huvudspänningens orientering och magnitud, se Figur 2.4a. När brytningen och raset fortsätter nedåt till ortens nivå, ökar sekundärspänningarna runt orten eftersom horisontalspänningarna tvingas ner under raset. Största huvudspänningen (den spänning som enbart är påverkad av raset, och inte av drivning av orten) roterar så att den inte längre är horisontell Figur 2.4b. Spänningsnivån på ortranden kan vara tillräckligt hög för att tryckbrott ska inträffa. När lastningsnivån har passerat liggväggsortens nivå med 100 m eller mer, har spänningarna minskat till en nivå som kan vara lägre än primärspänningarna i området, och största huvudspänningen har roterat till en orientering mer eller mindre parallell med malmkroppens stupning Figur 2.4c. När detta har skett kan blockutfall inträffa, eftersom spänningarna är för låga för att hålla kvar blocken och de delar av bergmassan som gått i brott under de tidigare höga spänningsnivåerna. .



Figur 2.4. Rotation av spänningar runt en liggväggsort i olika stadier.

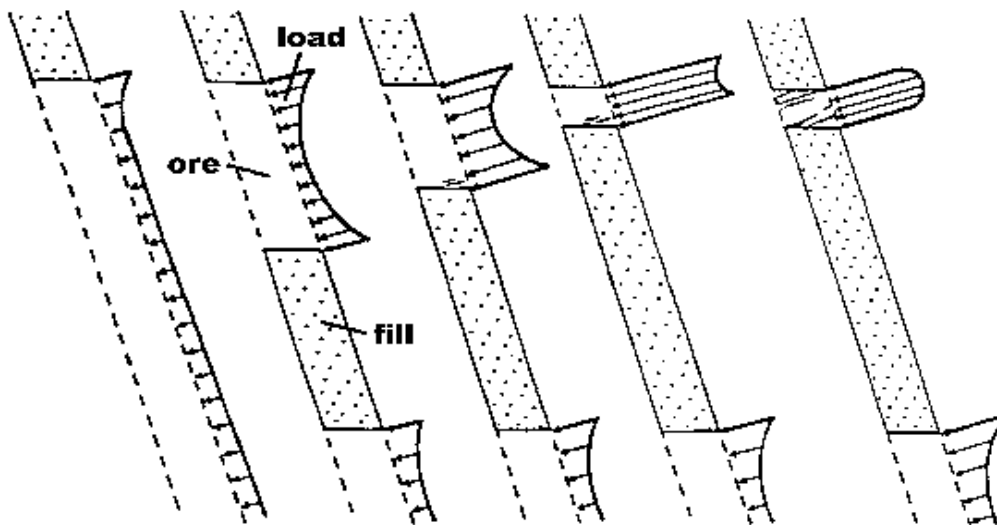
*Rotation of stress field during the life of a footwall drift.*

Permanent installationer som malm- och ventilationsschakt påverkas också av spänningsomfördelningen runt raset. Dessa typer av hålrum är placerade på större avstånd

från malmkroppen än fältorterna och drivs flera år innan malmbrytningen når den nivån. Ett schakt utsätts för varierande spänningsförhållanden, den nedre delen kan vara utsatt för ett oförändrat primärt spänningsfält, mittendelen kan vara utsatt för mycket höga spänningar medan den översta delen är utsatt för betydligt lägre spänningar (i det närmaste avlastat).

### ***Igensättningsbrytning***

Igensättningsbrytning är en vanlig metod både i Sverige och utomlands eftersom den kan användas i malmkroppar med varierande dimensioner. Uppåtgående igensättningsbrytning går ut på att malmen bryts ut i horisontella skivor, med början nerifrån. Varje etage består av åtta till tio skivor, vilket ger en etagehöjd på 40 till 60 m, och sedan avsätts en mellanskiva. När en skiva är färdigutbruten återfylls den och bildar sulan för nästa skiva. Spänningsomfördelningen vid uppåtgående igensättningsbrytning kan beskrivas enligt Figur 2.5.



Figur 2.5. Spänningsökning i brytningsrummets tak när brytningen fortskrider uppåt, efter Krauland och Söder (1988).

*Stress increase in stope roof as mining progresses upward, after Krauland and Söder (1988).*

När brytningen fortskrider uppåt ökar belastningen på malmkroppen ovanför och nedanför brytningsrummet. När brytningen närmar sig det utbrutna (och återfyllda) rummet ovanför, bildar den kvarvarande malmen en horisontell pelare (mellanskiva) som utsätts

för mycket hög belastning. Om spänningarna i mellanskivan är av samma storleksordning som hållfastheten, kommer brott att inträffa antingen i mellanskivan eller i sidoberget. När mellanskivan har gått i brott, leder styvhetsminskningen till att spänningarna omfördelas över och under brytningsrummet. Ofta börjar gruvbrytningen i ett dagbrott, för att sedan gå underjord. I dessa fall lämnas en takskena som blir alltmer uppsprucken allteftersom brytningen pågår under den, vilket leder till samma process som beskrevs för mellanskivan ovan. När takskenan slutligen går i brott och ej kan ta mer last, leder detta till samma typ av spänningsomfördelning runt gruvan som beskrevs för skivrasbrytning.

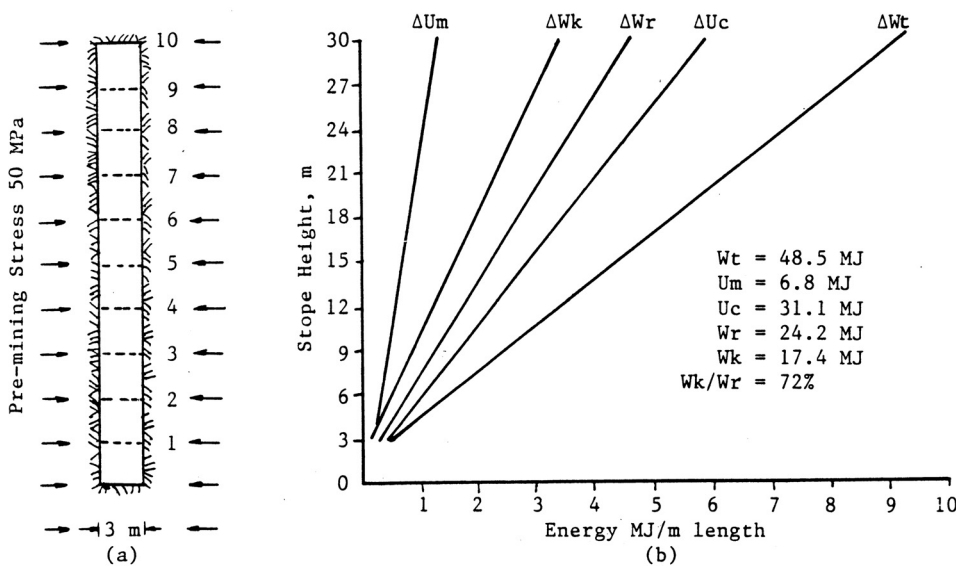
## 2.4 Bergmassans respons på energiförändringar

När berg tas bort för att skapa en öppning, deformeras den kvarvarande bergmassan och den installerade förstärkningen, vilket kan skapa sprickor och ibland även generera seismiska vågor. Deformation av bergmassan och förstärkningen, uppsprickning av bergmassan, glidning längs diskontinuiteter samt generering av seismiska vågor innebär att energi övergår till andra energiformer. Därför är det viktigt att analysera de energiförändringar som sker när man skapar en öppning. Några kriterier för att bedöma smållbergspotentialen är baserade på lagen om energins bevarande. För en mer utförlig beskrivning hänvisas till Hedley (1992), som gjorde följande observationer baserat på energianalys:

- Om utbrytning sker i oändligt små steg (inkrementellt), är processen stabil och ingen seismisk energi frigörs.
- Förändringen i potentiell energi driver processen; om denna kan minskas, minskar de andra energikomponenterna.
- Återfyllning är fördelaktigt för att den minskar förändringen i potentiell energi genom att minska brytningsrummets volumetriska konvergens, och den absorberar energi, vilket betyder att mindre energi finns tillgänglig att avges som seismisk energi.

Seismisk effektivitet är en kvot som används för att beskriva smållbergspotential. Den definieras som andelen energi som frigörs i form av seismisk energi ( $W_k/W_r$ ). Ju högre

andel, desto högre smällbergspotential. För att numeriskt studera de olika energikomponenterna vid inkrementell brytning, så studerade Hedley (1992) ett oförstärkt brytningsrum i en vertikal malmkropp. Malmkroppen var 3 m bred och 30 m hög, och bröts ut i 10 steg. Horisontalspänningen före brytning var 50 MPa. Förändringen i seismisk energi ( $W_t$ ) för varje steg erhöles genom att subtrahera den totala förändringen i potentiell energi för föregående steg från det nuvarande. Figur 2.6 visar hur energikomponenterna förändras för varje steg, med en linjär ökning allteftersom brytningen går uppåt. Kvoten  $W_k/W_r$  visar att 72 % av den totala frigjorda energin är seismisk energi. Ekvationerna som användes för beräkning av energikomponenterna finns beskrivna i Hedley (1992).



Figur 2.6. Energikomponenterna steg för steg under brytning av ett vertikalt brytningsrum, från Hedley (1992).

*Energy components per cut during mining of a vertical stope, from Hedley (1992).*

Som en jämförelse delades det översta steget upp i tre 1 m höga steg, eftersom en 1 m hög skiva borde vara en bra approximation av inkrementell brytning. Minskningen i skivhöjd gjorde att den seismiska effektiviteten minskade från 72 % till 59 % (Hedley, 1992), vilket fortfarande är långt ifrån en försumbar seismisk effektivitet.

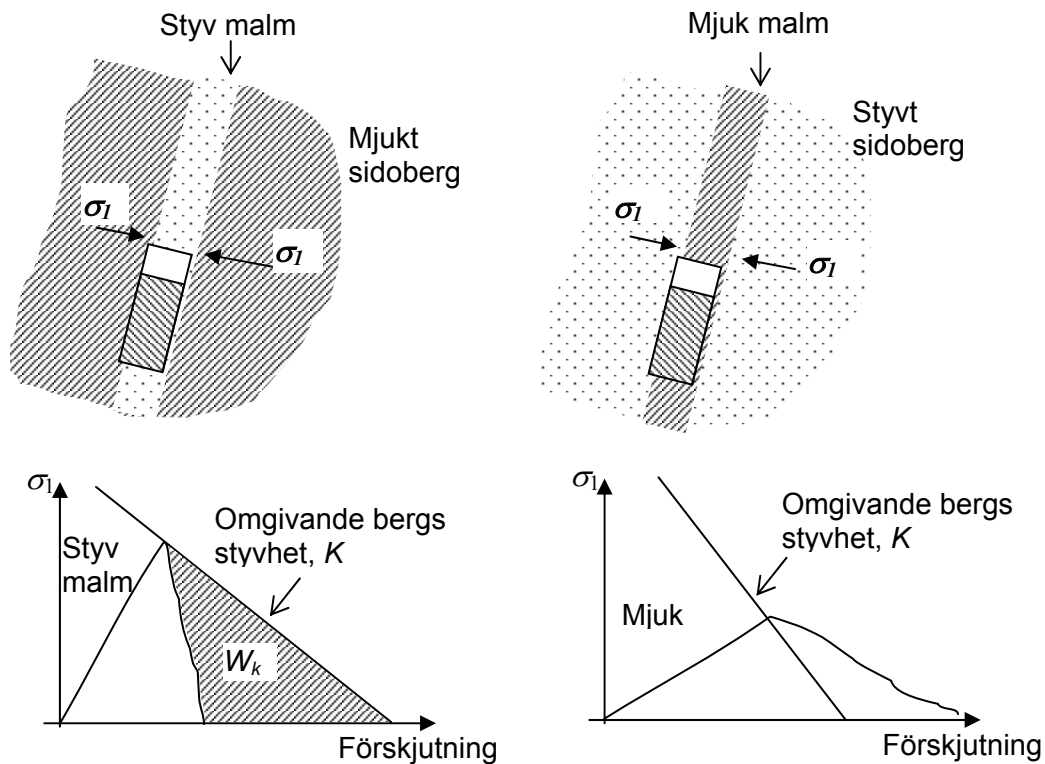




### 3 SEISMICITET – GENERELL BESKRIVNING

#### 3.1 Tryckspänningar och seismicitet

Tidigare antogs det att berg med hög enaxiell hållfasthet och hög elasticitetsmodul kunde lagra mer töjningsenergi än mjukare och mer deformerbart berg. Detta stämmer inte alltid, vilket visas i Figur 3.1. Spröda bergarter har vanligtvis en brantare avlastningskurva än mjuka bergarter. I Figur 3.1 är arean under belastnings-förskjutningskurvorna för både det spröda och mjuka berget ungefär densamma, vilket innebär att båda bergtyperna förbrukar samma mängd energi i brottsprocessen.

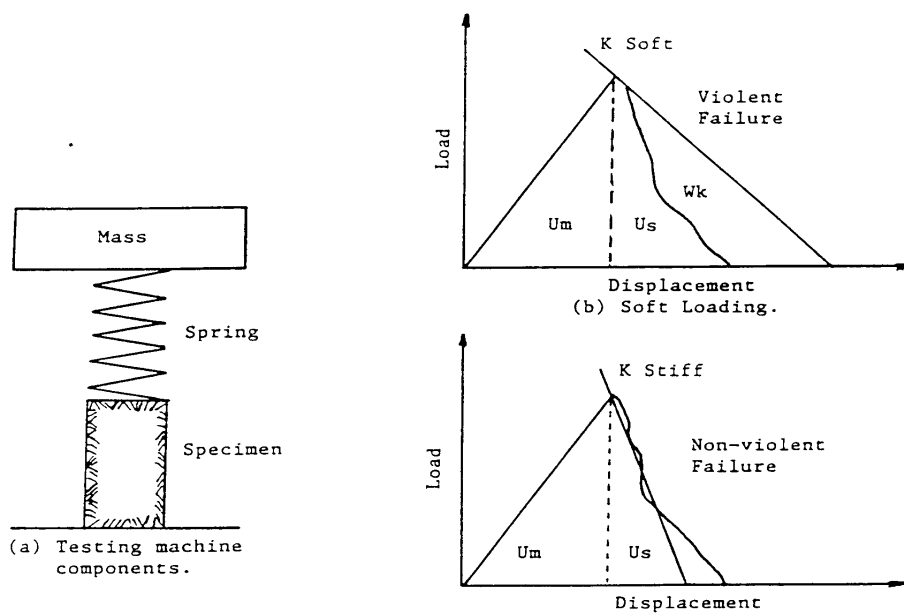


Figur 3.1. Spännings-förskjutningssamband för kombinationen styv malm – mjukt sidoberg respektive mjuk malm – styvt sidoberg.

*Stress-displacement relations for the combinations stiff rock – soft sidewall rock and soft ore – stiff sidewall rock, respectively.*

Vid utbrytning i en styv och spröd del av bergmassan, där omgivande berg har lägre styvhet (omgivande bergs styvhet =  $K$ ) än det spröda bergets avlastningsstyvhet (avlastningskurvas lutning) blir brottsprocessen ofta okontrollerad och våldsamt, se Figur 3.2.

Om avlastningsstyvheten är lägre än omgivande bergs styvhet, sker brottsprocessen kontrollerat, se Figur 3.2. Detta innebär att ett våldsamt lokalt brott på randen av en underjordskonstruktion kan inträffa även när bergmassan består av endast en bergart, eftersom avlastningsstyvheten ändå kan vara högre än bergmassans styvhet. Beroende på om belastningsutrustningen har låg eller hög styvhet blir förloppet vid brott i bergartsprovet kontrollerat respektive okontrollerat (våldsamt). Ett exempel på detta visas i Figur 3.2. I last-förskjutningsdiagrammen betecknar  $U_m$  energin i bergprovet,  $U_s$  energin som lagras i fjädern, och  $W_k$  den kinetiska energin.



Figur 3.2. Modell av samverkan mellan till exempel omgivande berg och malm (från Hedley, 1992).

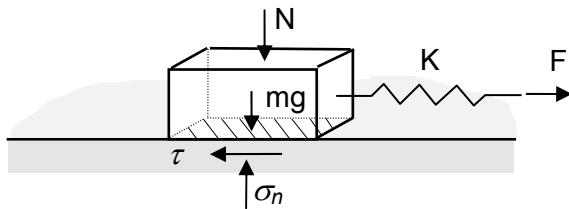
*Model of the interaction between e.g. surrounding rock and ore (from Hedley, 1992).*

Wawersik och Fairhurst (1969) fann vid enaxiell och triaxiell testning av provkroppar att brottbeteendet kunde delas upp i två klasser. I den första klassen var brottprocessen stabil, dvs. det krävdes en ökning av lasten för att minska bärförmågan. I den andra klassen var brottprocessen instabil, dvs. den energi som fanns lagrad i provkroppen var större än den energi som krävdes för att brottet skulle propagera. Ingen ökning av lasten krävdes alltså för att brottsprocessen skulle fortsätta. En annan observation var att för en viss bergart så kunde de två klasserna särskiljas som en funktion av omgivande tryck

under testet. Vid höga omgivande tryck kunde den instabila brottprocessen förhindras även för höga axiella tryck, och en större andel av energin gick åt för att deformera provet efter att högsta hållfastheten överskridits.

### 3.2 Skjuvspänningar och seismicitet

Glidning längs geologiska förkastningar orsakade av brytning (fault slip) och jordbävningar orsakas av samma mekanism, och problemet med att förutsäga händelser är det samma. Mycket arbete har lagts ned på att lösa problemet med att förutsäga jordbävningar, en av svårigheterna är att förstå exakt varför de inträffar. H. F. Reid var bland de första som utvecklade en teori om jordbävningars fysik. Efter att ha studerat jordbävningen i San Francisco 1906 presenterade han en teori som byggde på att spänningar och töjningar gradvis byggs upp över en viss tid, för att sedan plötsligt frigöras genom rörelser längs förkastningen (från Shearer, 1999). Detta är numera känt som den primära orsaken till tektoniska jordbävningar i jordskorpan. En enkel modell som visar mekanismen för glidning längs en förkastning visas i Figur 3.3. Denna typ av beteende kallas stick-slip.



Figur 3.3. Model av glidning längs en diskontinuitet.

*Model of slip along a discontinuity.*

Ett block med tyngden  $mg$  belastat med normalkraften  $N$ , vilar på ett plant horisontellt underlag. Blocket belastas sedan med kraften  $F$  som verkar parallellt med ytan som blocket vilar på. Kraften  $F$  överförs via en elastisk fjäder med styvheten  $K$ . På kontaktytan mellan blocket och underlaget verkar normalspänningen  $\sigma_n$  och skjuvspänningen  $\tau$ . Så länge blocket är i vila motsvaras skjuvhållfastheten av  $\mu_s \sigma_n$ , där  $\mu_s$  är den statiska friktionskoefficienten. Systemet är i jämvikt så länge

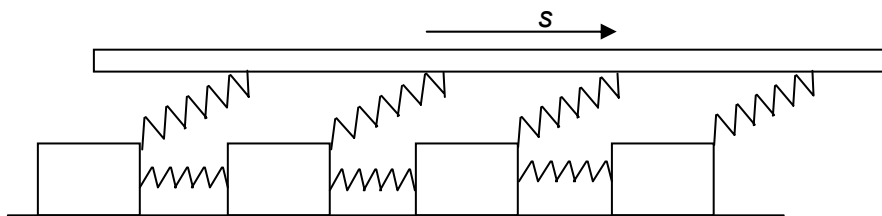
$$\mu_s \sigma_n - \tau > 0. \quad 3-1$$

Om kraften  $F$  ökas så att

$$\tau = \mu_s \sigma_n \quad 3-2$$

blir jämvikten instabil. Blocket börjar då röra på sig med en liten ökning av kraften  $F$ , vilket motsvarar en liten ökning av skjuvspänningen, detsamma gäller för en minskning av normalspänningen eller friktionskoefficienten. När rörelsen har påbörjats minskar friktionskoefficienten till  $\mu_d$  och blocket accelereras av en kraft som initieellt motsvarar  $A(\mu_s - \mu_d)\sigma_n$ , där  $A$  är arean för kontaktytan mellan blocket och underlaget. En stabil jämvikt uppnås när skjuvspänningen motsvarar  $\mu_d \sigma_n$ .

Om  $\mu_s$  och  $\mu_d$  är konstanta inträffar "jordbävningen" regelbundet med ett visst tidsintervall. Om den dynamiska koefficienten varierar mellan händelserna, kan tiden förutsägas men den kommande händelsens storlek kan inte förutsägas. Tiden mellan två händelser är proportionell mot den föregående glidningens storlek (Shearer, 1999). Om den statiska koefficienten varierar, kan tiden till nästa händelse inte förutsägas, men den kommande glidningens storlek är proportionell mot tiden från föregående händelse. Problemet är att när både  $\mu_s$  och  $\mu_d$  varierar kan varken tiden eller glidningens storlek förutsägas. Ett antagande som gäller för samtliga modeller är att förkastningen kan delas in i segment som inte samverkar med varandra. Jordens uppbyggnad är dock mer komplex än så, eftersom ett eller flera segment av en förkastning, eller till och med två eller flera förkastningar kan samverka och orsaka en jordbävning. Effekten av denna typ av samverkan kan modelleras enligt Figur 3.4, där flera block är sammankopplade med varandra och med en stång med hjälp av fjädrar.



Figur 3.4. Block-modell för jordbävningar, efter Shearer (1999).

*The block-slider model, after Shearer (1999).*

Stången påverkas av en dragkraft med konstant hastighet,  $s$ . Ett block som börjar glida kan sätta igång närliggande block, och detta kan leda till stora händelser. Denna typ av modell kan åstadkomma ”jordbävningar” med ett brett spektrum av magnituder och även ett  $b$ -värde (definition, se ekvation 4-4) som ligger nära de som observeras för verklig seismicitet. Små jordbävningar kan modelleras statistiskt, eftersom de inträffar ofta och har registrerats relativt lång tid. Stora jordbävningar inträffar inte lika ofta, vilket innebär att mängden data är för liten för att statistiska modeller ska kunna användas. Att förutsäga jordbävningar inom tidsramar av år till tiotals år är möjligt, under förutsättning att man har tillräckligt detaljerad information om spänningar, töjningar och förkastningens hållfasthet. Fokus har hittills varit att identifiera förvarnande faktorer, dvs. faktorer som avviker från normalt beteende före en jordbävning. Möjliga sådana faktorer är förändringar i seismicitetsmönster, variationer i utsläppshastighet av radongas samt elektromagnetiska anomalier. Den enda säkra förvarningen man funnit hittills är förskalv, vilket är skalv som inträffar strax innan och i närheten av det efterföljande huvudskalvet. Problemet är att de inte alltid förekommer. En möjlig förklaring till varför jordbävningar verkar omöjliga att förutse presenterades av Brune (1979). Han föreslog att stora jordbävningar startar som små jordbävningar som i sin tur börjar som ännu mindre jordbävningar, osv. Detta gör det nästan omöjligt att förutsäga stora jordbävningar, eftersom även om alla små skalv kunde förutses, hur skulle man kunna bestämma vilket som skulle starta en process av ständigt ökande skalv som till slut resulterade i ett stort skalv? I sin modell antog han att stora delar av förkastningen befann sig i ett spänningstillstånd som inte är kritiskt för att glidning ska ske, men att glidning kunde initieras av till exempel jordbävningar i närheten. Han föreslog också att förvarnande faktorer förekommer när förkastningen har ett spänningstillstånd nära brottspänningen. Studier av hur jordbävningar av olika storlekar initieras har visat att det inte finns någon skillnad mellan stora och små skalv, vilket stöder Brunnes teori. Detta innebär att det är omöjligt att säga hur stor jordbävningen ska bli utifrån de första registreringarna i seismogrammet.

### 3.3 Seismiska händelser knutna till hålrum

Denna typ av händelser inträffar i hålrummets omedelbara närhet och kan inte inträffa om det inte finns något hålrum (Ortlepp, 1997). De är ett direkt resultat av spänningsomlagringarna runt hålrummet, och sker oftast där spänningarna är som högst. Det karakteristiska med denna typ av händelse är det är det lokala brottet som avger energin. De vanligaste händelsetyperna i denna kategori beskrivs nedan; s.k. ”strain burst” och ”pillar burst”.

”Strain burst” är den vanligaste formen av smällberg i gruvor och andra underjordskonstruktioner. Denna term används för att beskriva ett våldsamt brottförlopp där bergblock av varierande storlek kastas ut från hålrummets rand. Brottformen kan vara spjälkning, vilket innebär att inga diskontinuiteter behöver finnas för att det ska bli utfall. En ”strain burst” orsakar vanligtvis en relativt begränsad skada och frigör relativt små mängder energi.

”Pillar burst” är en term som används för att beskriva våldsamma pelarbrott, som också sker som ett resultat av lokal spänningsomlagring. Skadorna orsakade av en ”pillar burst” kan bli omfattande beroende på den kollapsade pelarens placering i förhållande till andra pelare, samt i vilket skick omgivande berg och pelare befinner sig i. Mängden energi som frigörs vid en sådan händelse är större än för en ”strain burst”, så de avgivna seismiska vågorna kan orsaka skador i andra områden. Den plötsliga förlusten av stödet från en pelare, gör att spänningarna omlagras till närliggande pelare, som i sin tur kan gå i brott våldsamt beroende på hur nära brottlasten de befinner sig. Detta kan skapa en dominoeffekt som kan leda till att ett helt brytningsområde kollapsar, vilket skulle frigöra stora mängder energi.

### 3.4 Seismiska händelser knutna till geologiska diskontinuiteter

Denna typ av seismiska händelser är också ett resultat av spänningsomlagringar orsakade av gruvbrytning, men i en större skala. I takt med att gruvbrytningen i ett område fortskrider så ökar området som påverkas av spänningsomlagringarna, vilket kan leda till aktivering av förkastningar i området. Den vanligaste typen av storskaliga

seismiska händelser är s.k. ”fault slip”, som kan orsaka omfattande skador under jord, och påverka ett stort område. Dessa händelser kan beskrivas som brytnings-inducerade jordbävningar, och kan i värsta fall orsaka skador på markytan.

”Fault slip” är den term som används för att beskriva glidning längs en förkastning, och kan påverkas av brytning på två sätt. Dels kan brytning minska normalkraften över förkastningen, vilket minskar skjuvmotståndet längs förkastningen, och dels kan brytningen öka skjuvspänningarna längs förkastningen så att glidning inträffar. Skadorna på hålrums orsakas av energifrigörelsen från glidningen, vilken avges i form av seismiska vågor som när de träffar ett hålrum leder till:

- utstötning av block bildade av existerande sprickor,
- en dragspänning på randen, vilket resulterar i ett dragbrott samt utstötning av berget som gått i brott,
- en hög tryckspänning, vilket resulterar i brott som kan följas av utstötning av berg, samt
- utfall orsakade av skakning.





## 4 SEISMICITET – BRYTNINGSRELATERAD

Bergmassans seismiska respons på brytning övervakas med seismiska övervakningssystem. Information från ett brytningssteg kan användas för att förutsäga hur bergmassan kommer att bete sig under nästa brytningssteg. Övervakningssystemet registrerar information i form av seismiska vågor. För att få fram den önskade informationen används metoder som utvecklats av seismologer för att analysera jordbävningar. Detta kapitel beskriver några av de vanligaste termerna som används i litteraturen samt ger en generell överblick över seismisk övervakning. Några olika metoder för att förebygga och kontrollera seismicitet beskrivs också

Seismisk övervakning i gruvor används för att kvantifiera risker med seismicitet och som ett kontrollverktyg i olika metoder att förebygga eller kontrollera seismicitet. Men-decki et al. (1999) definierade följande mål med seismisk övervakning i gruvbrytning:

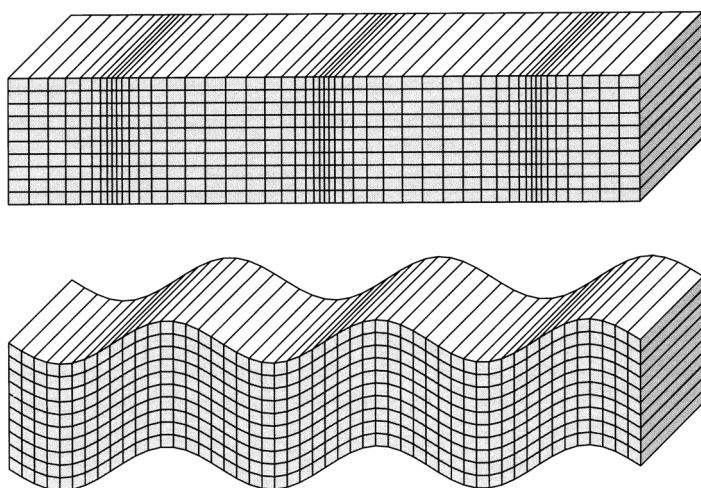
- Lokalisering av möjliga smällberghändelser: att indikera var möjliga smällberghändelser associerade med medelstora till stora seismiska händelser kan ske samt att bidra med information vid räddningsoperationer.
- Förebyggande: att bekräfta antaganden och parametrar som används för gruvplanering och numerisk modellering, för att förbättra förstärkningsinsatser, layoutplanering, brytningsplanering, etc.
- Kontroll: att upptäcka förändringar i seismiska parametrar i tid och rum, för att förbättra insatser för att kontrollera seismicitet, t.ex. var och när avlastningsprängning ska ske, när man ska avbryta/återuppta brytning i ett visst område, bedöma risker att utsättas för smällberg etc.
- Varningar: att upptäcka oväntade eller kraftiga förändringar i olika seismiska parametrars beteende, och att känna igen mönster som kan leda till att smällberg inträffar. Detta underlättar bedömning av risken att utsättas för smällberg.
- Tillbakaräkning: för att förbättra gruvplanering och övervakningsprocesser. Numerisk och seismisk tillbakaräkning av stora stabilitetsproblem är viktig även om inga stora skador inträffade. Det är också viktigt att analysera bergmassans seismiska beteende

med avseende på pelare, återhyllning, olika brytningslayouter, brytningsmetoder och utbrytningshastigheter, för att göra brytningen säkrare och mer lönsam.

## 4.1 Seismicitet och jordbävningseismologi

### 4.1.1 Förkastningar och seismiska vågor

Initiering av seismiska vågor är en viktig del av seismologi and seismicitet, varför det är rimligt att anta att de fysiska och matematiska samband som utvecklats för att beskriva och analysera jordbävningar också borde gälla för brytningsinducerad seismicitet, även om skalan kan behöva justeras. Van Aswegen et al. (1997) konstaterar att de fysiska lagar som kontrollerar deformationsprocessen från centimeter till kilometerskalan är i princip desamma, vilket betyder att seismologi i viss mån är oberoende av skala. Detta leder till den intressanta slutsatsen att seismologisk teori för jordskorpan kan appliceras på fenomen från mikroskalv och labresultat till jordbävningar. Seismicitet i gruvor kan ses som ett mellansteg mellan dessa extremfall, där vissa händelser har samma storlek som jordbävningar medan andra är lika små som akustiska emissioner från labförsök.



Figur 4.1. Partikelrörelse i en P-våg (övre) och en S-våg (nedre), från Shearer (1999).

*Particle movement in P-wave (top) and S-wave (bottom), from Shearer (1999).*

Spänningsrelaxation och avgivning av seismiska vågor från källområdet sker simultant. Det finns två typer av seismiska volymsvågor, P-vågor (eller tryckvågor) och S-vågor (eller skjuvvågor) (Shearer, 1999). P-vågor kan också kallas longitudinella vågor eller dilatationsvågor. I en P-våg rör sig partiklarna i vågens rörelseriktning, medan partiklarna i en S-våg rör sig vinkelrätt vågens rörelseriktning, se Figur 4.1.

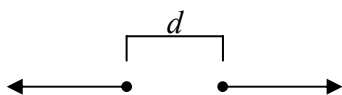
#### 4.1.2 Seismiskt moment och momenttensorn

Det seismiska momentet,  $M_0$ , eller det skalära momentet är ett mått på en jordbävningens styrka, och är det mest pålitliga måttet på styrkan hos en seismisk händelse (Gibowicz och Kijko, 1994). Det definieras i termer av parametrar från källmodellen med dubbla kraftpar som skjuvdeformation (förklaras nedan) och uttrycks som

$$M_0 = GDA, \quad 4-1$$

där  $G$  är skjuvmodulen vid initieringspunkten,  $D$  är medelvärdet av skjuvförskjutningen och  $A$  är den area som glidningen inträffade över. Ibland kan det seismiska momentet beräknas från Ekvation 4-1 utifrån fältresultat, men oftast bestäms det utifrån seismiska registreringar, vilket dock kräver en mer komplicerad formel.

En jordbävning definieras som en glidning längs en diskontinuitet (förkastning) i bergmassan. För att förstå hur seismiska vågor initieras och hur man kan relatera den avgivna energin till initieringspunkten (källan), måste man studera källans fysikaliska egenskaper, samt använda en mekanisk modell som representerar den fysiska uppsprickning som skett. Den mekaniska modellen beskriver källan genom ett system av ekvivalenta krafter som verkar i en punkt. En ensam kraft som verkar i en punkt kan bara vara resultatet av externa krafter, så interna krafter som beskriver en punktkälla måste verka i motsatta riktningar.



Figur 4.2. Ett enkelt kraftpar eller dipol.

*A simple force couple, or dipole.*

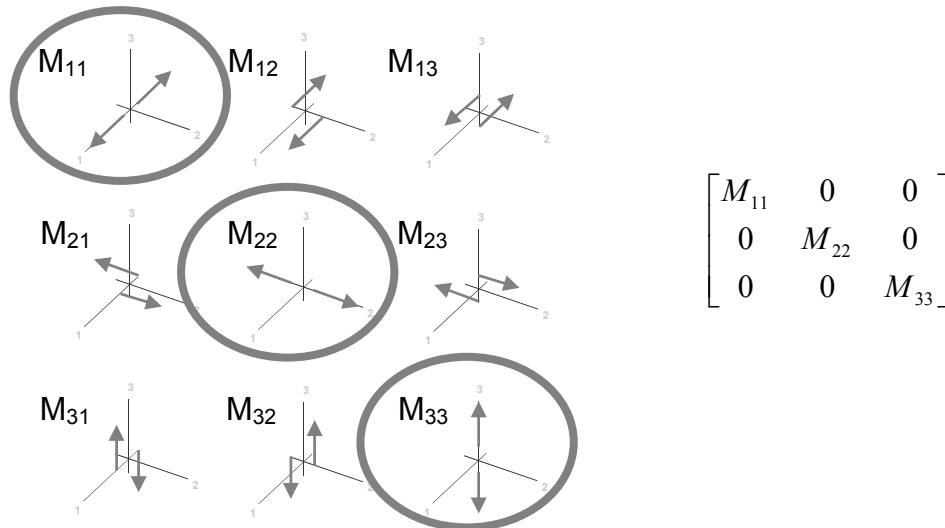
Det enklaste kraftsystemet som är i momentjämvikt är det enkla kraftparet eller dipolen, se Figur 4.2. Om krafterna separeras med avståndet,  $d$ , vinkelrätt mot krafternas verkningsriktning, är systemet inte längre i jämvikt, om det inte finns ett annat kraftpar som balanserar momentjämvikten. Så ett dubbelt kraftpar bevarar momentjämvikten, se Figur 4.3.



Figur 4.3. Obalanserat kraftpar (vänstra) och balanserat dubbelt kraftpar (högra).

*Unbalanced force couple (left) and balanced double-couple (right).*

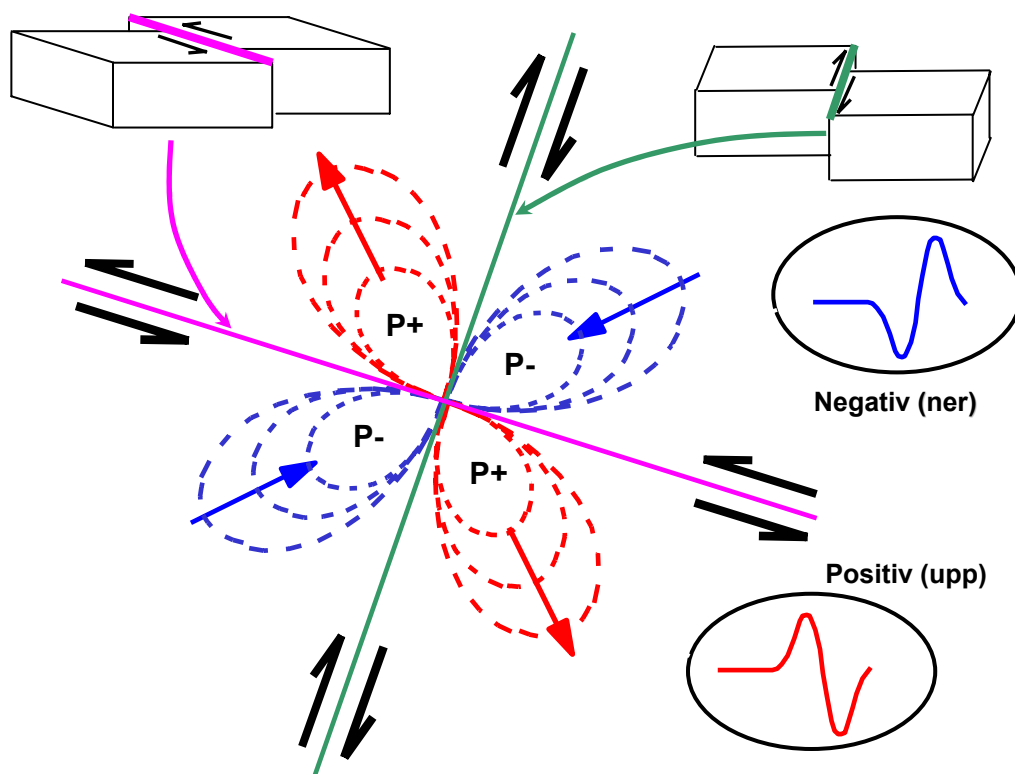
Kraftpar kan användas för att beskriva skjuvrörelser, ett faktum som används i momentensorn. Den enklaste källan är en punktkälla, vilken t.ex. kan representera en explosion. De tre kraftpar som behövs för att beskriva vågrörelserna som orsakas av en explosion visas i Figur 4.4 tillsammans med de övriga sex kraftparen som utgör momentensorn.



Figur 4.4. Momentensorn med de tre kraftpar som beskriver en explosion inringade (Andersen, 2001).

*The moment tensor with the three force couples describing an explosive source circled (Andersen, 2001).*

Vilken skjuvrörelse som helst kan beskrivas med de kraftpar som finns i tensorn. Om glidning initieras längs en vertikal förkastning, kommer P-vågor att avges utåt från initieringspunkten. P-vågorna bildar tryck-kvadranter (rörelse bort från källan) och dragkvadranter (rörelse in mot källan) runt denna punkt, se Figur 4.5. Tryckkvadranterna benämns P+, och dragkvadranterna P-. Den starkaste rörelsen inträffar mitt i varje kvadrant, i 45° vinkel mot förkastningsplanen.



Figur 4.5. Polarisering av P-vågor runt initieringspunkten (Andersen, 2001).

*Polarization of P-wave around the source of slip (Andersen, 2001).*

I en modell med dubbla kraftpar finns det i allmänhet två olika förkastningsplan som motsvarar samma seismiska observationer. Den förkastning där glidningen verkligen inträffade kallas den primära och den andra för den sekundära. För att bestämma vilken förkastning som är primär, måste man ha mer information som till exempel var efter-skalven inträffade eller studier av sprickor på markytan.

### 4.1.3 Jordbävningars magnitud

Idag finns det flera olika typer av magnitudskalor, men de mest använda är de som relaterar till en händelses största uppmätta amplitud. De allra mest kända är den lokala eller Richter magnituden,  $M_L$ , volymstågsmagnituden,  $m_b$ , och ytvågs magnituden,  $M_s$ . Magnituder är relaterade till mängden energi som frigörs och beror inte på den bakomliggande mekanismen (Udías, 1999). Energin är proportionell mot kvadraten på amplituden, vilket betyder att magnituden är proportionell mot logaritmen av energin. Eftersom det är enkelt att mäta amplitud så fortsätter dessa magnitudskalor att vara populära trots sina nackdelar (Shearer, 1999). En av begränsningarna är att amplituden mäts vid en enda frekvens (eller period), vilket sedan definierar magnituden som den seismiska energi som avges över ett fast, smalt frekvensområde. Frekvensfördelningen förändras beroende på jordbävningens storlek, vilket innebär att magnitudskalorna ger olika magnitud när de appliceras på samma jordbävning, beroende på vilket frekvensområde de är definierade för. En annan nackdel är att de tenderar att mätas, dvs., amplituden vid en given frekvens överstiger aldrig ett högsta värde (Shearer, 1999). Det seismiska momentet är ett bättre mått på en jordbävningens storlek, men trots det så är magnitudskalorna populära. I Tabell 4.1 nedan sammanfattas några av de vanligaste magnitudskalorna

Tabell 4.1. De vanligaste magnitudskalorna.

*The most commonly used magnitude scales*

Magnitudskala	Samband	Parametrar
Richter eller lokal magnitud	$M_L = \log_{10} A(d) - \log_{10} A_0(d)$	$A$ = händelsens maximala amplitud på avståndet $d$ , $A_0$ = amplitud för en jordbävning med magnitud $M = 0$ på avståndet $d$
Volymstågsmagnitud	$m_b = \log_{10}(A/T) + Q(h, \Delta)$	$A$ = maximal amplitud, $T$ = motsvarande period för den registrerade volymstågen (vanligen P-våg), $Q$ = empirisk funktion av distans $h$ , och fokal djup $\Delta$ .
Ytvågs magnitud	$M_s = \log(A/T) + 1.66 \log \varphi + 3.3$	$A$ = maximal amplitud, $T$ = motsvarande period för den registrerade Rayleighvågen (vanligtvis 20 s), $\varphi$ = avstånd till epicentrum i grader, 3.3 = konstant.
Nuttlimagnitud	$M_n = -0.1 + 1.66 \log \Xi + \log\left(\frac{A}{IT}\right)$	$\Xi$ = avstånd till epicentrum i km, $A$ = halva den maximala amplituden för S-vågen, $I$ = instrumentets förstärkningsfaktor, $T$ = period i s.

Richter introducerade den lokala magnitudskalan,  $M_L$ , på 1930-talet. Fördelen med Richterskalan är att alla efterföljande magnitudskalor är relaterade till den, vilket gör att

man lättare kan jämföra händelser från olika platser i världen. Nackdelen är att den definierades för Kaliforniska förhållanden, och att den relaterar till ett instrument som sällan används idag. Volymsvågsmagnituden,  $m_b$ , är en global magnitudskala, som är kalibrerad mot Richterskalan för små händelser i Kalifornien (Shearer, 1999). Skalan börjar mättas när  $m_b = 5.5$  och är total vid  $m_b = 6.5$ , vilket betyder att volymsvågsmagnituden sällan överstiger 6.5 även för mycket stora jordbävningar. En annan global magnitudskala är ytvågsmagnituden,  $M_s$ , som endast kan användas för jordbävningar på litet djup eftersom ytvågornas amplitud minskar kraftigt med djupet under markytan. Skalan börjar mättas när  $M_s = 7.0$ . Volymsvågs- och ytvågsmagnituderna sammanfaller endast vid  $M_s = 6.6$ . Vid lägre magnituder ger  $m_b$  ett högre värde, och för högre magnituder ger  $M_s$  ett högre värde. Förhållandet mellan de två skalorna är

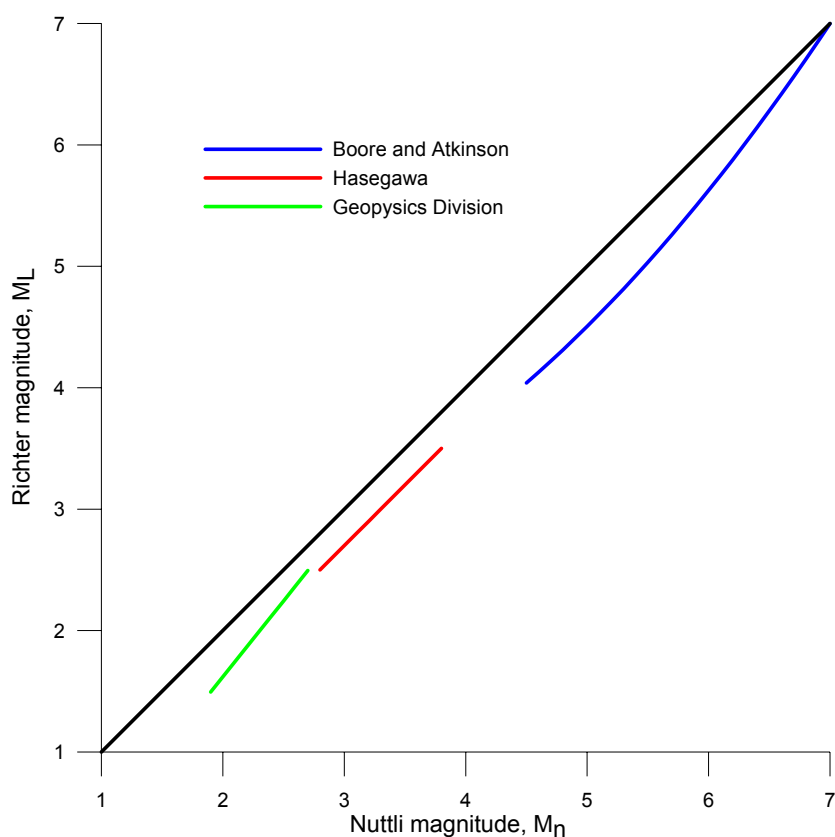
$$m_b = 0.63M_s + 2.5. \quad 4-2$$

Skillnaderna mellan skalorna och mättnadseffekten låg bakom utvecklingen av momentmagnituden för stora jordbävningar,  $M_w$ , som introducerades av Kanamori. Momentmagnituden har senare använts som ett mått på en jordbävningens styrka. Den formella definitionen gjordes av Hanks och Kanamori (1979)

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 6.1 \quad 4-3$$

där  $M_0$  är det seismiska momentet i Nm. Fördelen med denna skala är att den genom det seismiska momentet är relaterad till en fysisk egenskap hos källan, samt att den inte bli mättad ens för väldigt stora händelser.

Nuttlimagnituden,  $M_n$ , utvecklades specifikt för brytningsinducerad seismicitet i Kanada. Förhållandet till Richtermagnituden varierar, men i intervallet som är intressant för smällberg ( $1.5 < M_L < 4.0$ ) ger Nuttliskalan mellan 0.3 och 0.6 enheter högre magnitud än Richterskalan för samma händelse. Flera författare har tagit fram samband mellan de två skalorna, varav tre visas i Figur 4.6 och Tabell 4.2 (Hedley, 1992).



Figur 4.6. Samband mellan Nuttli och Richtermagnitud, efter Hedley (1992).

*Relationship between Nuttli and Richter magnitude scales, after Hedley (1992).*

Tabell 4.2. Samband mellan Nuttli och Richtermagnitud (Hedley, 1992).

*Relationships between Richter and Nuttli magnitude (Hedley, 1992).*

Samband	Intervall	Författare
$M_L = 1.25M_n - 0.88$	$1.9 \leq M_n \leq 2.7$	Geophysics Division of Canada
$M_L = M_n - 0.3$	$2.8 \leq M_n \leq 3.8$	Hasegawa (1983)
$M_L = 2.715 - 0.277M_n + 0.127 M_n^2$	$4.5 \leq M_n \leq 7.0$	Boore och Atkinson (1987)

Stora jordbävningar inträffar mycket mer sällan än små, och detsamma gäller seismiska händelser i gruvor. Detta magnitudfrekvens samband beskrevs av Gutenberg och Richter och kan uttryckas som

$$\log N = a - bM$$

4-4



där  $N$  är antalet händelser med magnituder inom intervallet  $M \pm \Delta M$ . Ekvation 4-4 kan antingen tolkas som ett kumulativt samband, om  $N$  är antal händelser med magnitud lika med eller större än  $M$  inom ett givet tidsintervall, eller som en densitetslag, om  $N$  är antal händelser i ett litet magnitudintervall runt  $M$  (Gibowicz and Kijko, 1994). Parametern  $a$  är ett mått på seismicitetsnivå,  $b$  beskriver det relativa antalet små och stora händelser i ett visst tidsintervall. Ett typiskt intervall för  $b$ -värdet är mellan 0.8 och 1.2, och  $b = 1$  betyder att antalet jordbävningar ökar med en faktor 10 för varje enhetsminskning i magnitud (Shearer, 1999).

#### 4.1.4 Seismisk energi

Den seismiska energin beskriver risken för att skador ska uppstå på konstruktioner bättre än det seismiska moment, som är ett mått på en jordbävningens storlek. Seismisk energi används vanligtvis i gruvor som ett mått på en seismisk händelses storlek (Gibowicz and Kijko, 1994). Kvoten mellan P-vågsenergi och S-vågsenergi kan användas för att bestämma vilken mekanism som ligger bakom händelsen. För jordbävningar ligger kvoten  $E_S/E_P$  mellan 10 och 30. Om en stor procentandel av den totala energin finns i S-vågen så är mekanismen troligen ett skjuvbrott (Hedley, 1992). För seismiska händelser i gruvor ligger denna kvot mellan 1.5 och 30. Den låga mängden energi i S-vågen kan förklaras med att dessa händelser troligen orsakas av en annan mekanism än skjuvbrott. Den totala seismiska energin,  $E_t$ , som avges från en förkastning kan bestämmas utifrån magnituden. Några olika samband mellan seismisk energi och magnitud presenteras i Tabell 4.3.

Tabell 4.3. Samband mellan seismisk energi och magnitud (Hedley, 1992).

*Relationship between seismic energy and magnitude (Hedley, 1992).*

Magnitudskala	Samband	Parametrar
Richter eller lokal magnitud, $M_L$	$\log W_k = 1.5M_L - 1.2$	$W_k$ = seismisk energi [MJ]
Volymsvågs-magnitud, $m_b$	$\log E_t \approx 5.8 + 2.4m_b$	$E_t$ = total seismisk energi [ergs] (1 erg = $10^{-7}$ J)
Nuttlimagnitud, $M_n$	$\log W_k = 1.3M_n - 1.75$	$W_k$ = seismisk energi [MJ]

## 4.2 Seismisk övervakning

Seismisk övervakning bör övervägas i gruvor som är seismiskt aktiva, eftersom detta kan ge värdefull information om bergmassans tillstånd runt gruvan, utöver information om var och hur stora de seismiska händelserna är. För att underlätta för en gruva att fatta beslut om att inskaffa ett seismiskt övervakningssystem utvecklade Hudyma en enkät ”Seismic risk questionnaire” (Potvin och Hudyma, 2001). Genom att svara ”ja” eller ”nej” på 16 frågor som handlar om seismicitet och ljud i berget, får man en rekommendation om huruvida ett seismiskt system skulle kunna ge mera värdefull information för gruvans produktion eller inte. Några av frågorna från enkäten finns fritt översatta nedan:

- Är det normalt att berget ”låter” (knakar, sprakar och smäller) i mer än några timmar efter tillredningssprängning?
- Kan man se omfattande spänningsrelaterade skador i orter i närheten av brytningsrum?
- Kan man regelbundet känna seismiska händelser på markytan (mer än ett par gånger per år)?
- Inträffar stora seismiska händelser vid tidpunkter som inte kan kopplas till produktionssprängningar i brytningsrummen dvs., flera dagar efter sprängning eller helt utan samband med stora salvor?
- Har personalen någon gång vägrat arbeta på grund av seismicitet eller att berget ”låter”?

Enkäten utvecklades för australiensiska skivpallgruvor, men kan även användas av gruvor med andra brytningsmetoder. Som ett tillägg till enkäten utvecklades också en blankett (Rock noise report) som fylls i av underjordsarbetarna när de hör eller känner en seismisk händelse, se Figur 4.7. I denna blankett beskrivs ljudet från en händelse i termer av poppande, knakande, högljudd knall, explosion, eller avlagset dunder (Potvin och Hudyma, 2001). Hur händelsen kändes beskrivs i termer som lätt vibration, duns, eller om vibrationen kändes i benen.

<b>ROCK NOISE REPORT</b>		
TIME AND DATE:	YOUR LOCATION:	
YOUR NAME AND YOUR ACTIVITY AT THE TIME OF NOISE:		
Did you hear the noise?	Yes	No
What did it sound like?	Popping and cracking Distant rumble	Sharp cracking noise Air concussion or air blast
		Loud bang or explosion Was there more than one noise?
Other details: _____		
Did you feel the noise?	Yes	No
What did it feel like?	Slight Vibration Thump or thud Felt like ground dropped	Extended vibration (a second or longer) Felt vibration in your legs Felt vibration on surface
Did you notice other conditions?	Yes	No
New loose / ground falls / spalling of rock		New cracks in the rock or movement on old cracks
Damage ground support, ie rock bolt heads / plates popped off		Abnormal amount of dust after the rock noise
New damage / cracking of brick or concrete walls, floors, etc.		Did you hear rock moving, rolling, or falling?
Other details. Describe: _____		
Do you want feedback on your report?		
	Yes	No

Figur 4.7. ”Rock noise report”, modifierad efter Potvin och Hudyma (2001).

*Rock noise report, modified after Potvin and Hudyma (2001).*

Denna blankett i kombination med Tabell 4.4 kan användas för att bedöma hur omfattande seismicitetsproblemet är samt olika händelsers ungefärliga magnitud. Tabell 4.4 utvecklades av Hudyma för en gruva i Kanada, New Brunswick Mining and Smelting, men stöds av erfarenheter från australiensiska gruvor. Hudyma (2004) använde denna tabell i sin undersökning om seismicitet i gruvor för att bedöma magnituder i gruvor utan seismiska övervakningssystem. Bedömningen baserades på hur gruvan hade beskrivit händelsen med avseende på hur den lät eller kändes.

Tabell 4.4. Bedömning av magnitud utifrån hur händelsen upplevts (Hudyma, 2004).

*Qualitative relation between the approximate magnitude of an event, and how it is felt in the mine (Hudyma, 2004).*

<b>M<sub>L</sub></b>	<b>Description</b>
-5.0	Local popping and cracking just audible underground.
-4.0	Not detectable by seismic monitoring system. This level of seismic noise is quite normal following a development blasts.
-3.0	Small bangs or bumps felt nearby. Typically only heard relatively close to the source of the event. This level of seismic noise is quite normal following a development blasts in stressed ground. Audible, but vibration too small to be felt. Probably not detectable by seismic monitoring system.
-2.0	Significant ground shaking. Felt as good thumps or rumbles. May be felt more remote from the source of the event (i.e., more than 100 meters away). Should be detectable by seismic monitoring system.
-1.0	Often felt by workers throughout the mine. Major ground shaking or airblast. Similar vibration to a distant underground secondary blast.
0.0	Vibration and airblast felt and heard throughout the mine. Bump commonly felt on surface (hundreds of meters away) but may not be audible. Vibration felt on surface similar to those generated by a development round.
1.0	Felt and heard very clearly on surface. Vibration felt on surface similar to a major production blast. Can be detected by regional seismological sensors located hundreds of kilometers away.
2.0	Vibration felt on surface is greater than large production blasts.

## 4.3 Att förebygga och kontrollera seismicitet

### 4.3.1 Introduktion

Orsaken till smällberg är (i många fall) en kombination av styvt berg och spänningar höga nog att överskrida bergets hållfasthet. Det bör noteras att töjningsenergi lagras i en bergvolym, men att energi avges längs ytor inne i volymen (Brummer och Blake, 1998). Potentialen för våldsamma brottförlopp är högre i homogent berg, dvs. i berg med få naturliga sprickor eller liten variation i mineralsammansättning. I en inhomogen bergmassa utsatt för höga spänningar är det troligt att det bildas mikrosprickor eller att skjuvning sker längs befintliga sprickor, vilket leder till att styvheten minskar och att mer energi förbrukas (Brummer och Blake, 1998). För att minska de våldsamma brottförloppen kan man antingen göra berget mindre styvt genom att skapa skjuvning längs befintliga svaghetsplan, eller minska spänningarna som verkar på den del av berget där smällberg kan komma att inträffa. Det finns flera metoder för att minska styvheten, och spänningarna kan minskas t.ex. genom att förändra layouten, vilket kan förhindra att

pelare bli överbelastade. Genom att ändra tvärsnitt kan man också minska spänningskoncentrationerna på randen. Om en layout- eller tvärsnittsförändring inte är möjlig, så finns det andra metoder för att minska potentialen för våldsamma brottförlopp som är mindre effektiva, men som ändå ger en viss effekt. I detta kapitel beskrivs några metoder för att förhindra eller minska konsekvenserna av seismicitet.

### 4.3.2 Avlastning

Avlastningssprängning används för att genom sprängning avlasta en begränsad bergvolym, med resultatet att spänningarna som verkade på den volymen omfördelas till närliggande berg som inte påverkades av själva sprängningen (Tooper et al., 1997).

För att minska potentialen för våldsamma brottförlopp så kan man antingen minska bergets styvhet eller orsaka skjuvning längs befintliga sprickor. Det finns två sätt att åstadkomma detta med avlastningssprängning. Det första alternativet är att spränga så hårt som möjligt utan att skada hålrummet alltför mycket. Motivet är att att ”mjuka upp” en zon genom att skapa en zon med många mikrosprickor med små inbördes avstånd. Den mjuka zonen leder till en ändring av det mekaniska beteendet från elastisk-spröd till plastisk deformation (Brummer och Blake, 1998).

Tooper et al. (1997) använde det andra alternativet och konstaterar att avlastningssprängning inte skapar nya sprickor framför gaveln, utan leder till att glidning sker längs befintliga sprickor på grund av det höga gastycket från explosionen. Den uppspruckna bergmassan som blir resultatet fungerar som en skyddande ”kudde” i gaveln. Om en seismisk händelse inträffade utanför den avlastade zonen skulle den dynamiska dragvågen inte orsaka lika stora skador som om gaveln inte vore avlastad. Avlastningssprängning ger enbart en lokal effekt, så den gavel man vill förhindra smällberg i är den man måste avlasta och effekten är också begränsad i tid. Mekanismen bakom avlastningssprängning bygger på spänningsomlagringar till följd av inducerade deformationer i det uppspruckna berget framför gaveln, så den uppspruckna zonen kan fortfarande bära höga laster. Det är därför möjligt att senare brytning kan skifta spänningar tillbaka mot den tidigare avlastningssprängda gaveln, och att då en s.k. ”face burst” kan inträffa.

Ett exempel på detta från Western Deep Levels South Mine (Sydafrika) beskrivs av Toper et al. (1997). Brytningen på en avlastningssprängd front (E) stoppades, medan brytning fortsatte på den närliggande (C och F). Två veckor senare inträffade en händelse med magnitud 1.1 i närheten av front E, som orsakade en ”face burst” som orsakade skador på förstärkningen.

Generellt sett lyckas man ofta med avlastning av orter, och många gruvbolag har utarbetat egna standarder som täcker in bormönster, mängd och typ av sprängämnen, samt när sprängning ska ske (Brummer och Blake, 1998). Avlastning av pelare är svårare, eftersom sprängningens effekt inte är helt klarlagd. Avlastar man en pelare, så omfördelas spänningarna till de omkringliggande pelarna som i sin tur kan bli för högt belastade.

### ***Sydafrika***

Avlastningssprängning introducerades som ett sätt att förbättra smällbergssituationen i djupa gruvor. I Sydafrika där longwall mining är vanligt, har man utvecklat två metoder för att avlastningsspränga gavlar: parallellt respektive vinkelrätt gaveln. För beskrivning av dessa metoder hänvisas till Toper et al. (1997).

### ***Sverige***

Avlastningssprängning i Näsliden, Laisvall och Malmberget sammanfattas kort här, och för en utförligare beskrivning hänvisas till Larsson (2004a).

I Näslidengruvan, som använde igensättningsbrytning, gjorde man ett försök med avlastning av brytningsrum på grund av att de höga horisontalspänningarna orsakade omfattande spjälkning i taket (Krauland och Söder, 1988). Idén var att med avlastningssprängning minska styvheten i en del av bergmassan nära hålrummet för att omfördela spänningarna bort från randen. Avlastningen av brytningsrum #3 misslyckades eftersom berget inte blev tillräckligt uppkrossat runt borrhålen på grund av att sprängämnet hade för låg detonationshastighet, samt att slitsen hade placerats i en seg klorit. Ett nytt försök med avlastningssprängning gjordes i brytningsrum #5, där höga spänningar orsaka-

des av en krympande mellanskiva. Avlastningshålen sprängdes tillsammans med produktionssalvan. Ingen förändring kunde märkas under de första salvorna, men efter den fjärde upphörde seismiciteten, och spjälkningen minskade i omfattning.

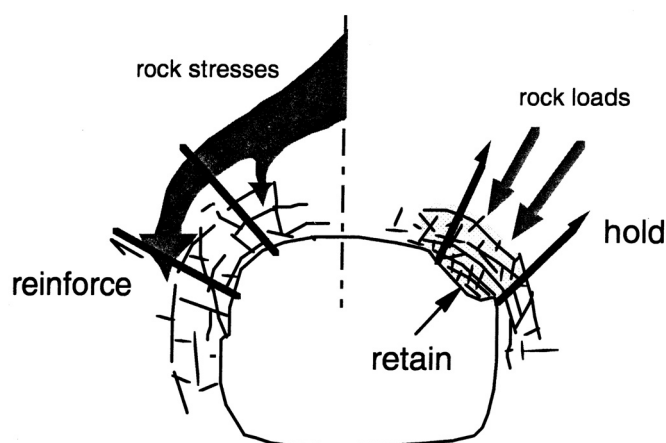
Laisvall var en rum-och-pelarsgruva som karakteriserades av höga horisontalspänningar trots ett relativt litet djup, ca 220 m (Engberg, 1989). Den tabulära malmkroppen bröts från två parallella orter, 1400- och 1500-orterna. 1400-orten drevs först, med 1500-orten ca 15 m bakom. Brytning vinkelrätt mot de två huvudorterna utfördes så att brytningsfronten blev kilformad. Spjälkbrott i taket inträffade främst under drivningen av den första orten, så den andra verkade drivas i en avlastad zon. Bultning var inte tillräckligt för att förhindra uppspjälkningen och säkerställa stabiliteten, så man beslöt att försöka med avlastningssprängning. Avlastningssprängning utfördes i tre parallella hål i höger anfang. Skadekartering av taket visade att där avlastningssprängning hade utförts, var skadorna mindre omfattande både avseende area och djup. På en del ställen där avlastningssprängningen inte hade utförts som planerat hade skadorna i taket ökat, vilket tydde på att avlastningssprängningen var ett effektivt sätt att minska spänningarna i taket.

I Malmberget, under drivningen av huvudnivån på 815 (1985) gjorde stora seismicitetsproblem att det gick långsamt (Borg, 1988). Orten hade en tvärsnittsarea på 60 m<sup>2</sup>, och seismiciteten orsakade spjälkning av taket upp till 4 m ovanför planerad takhöjd, vilket gav ett kilformat tak ("kyrka"). För att öka säkerheten och indriften gjorde man försök med avlastningssprängning. Idén var att omfördela spänningarna bort från randen längre in i bergmassan, och att undvika att skada berget närmast randen. Avlastningssprängning utfördes på båda sidor av orten, och ledde till en markant minskning av seismiciteten och överberget.

### **4.3.3 Förstärkning**

Förstärkning används i nästan samtliga underjordsgruvor för att stabilisera hålrum och för att säkerställa personalens säkerhet. De flesta gruvor börjar med att förstärka för att hålla kilar på plats eller på grund av svagt berg, men när gruvan blir större och djupare

kan andra problem som seismicitet och smällberg dyka upp. För att förstärkningen ska vara effektiv under seismiska förhållanden måste den klara både höga statiska och dynamiska laster. Förstärkningens funktion är i princip att förstärka bergmassan för att förhindra brott, och om detta inte går, att hålla tillbaka och säkra löst bergmaterial (Kaiser et al., 1995). Syftet med bergförstärkning är att bergmassan ska kunna bära sig själv. Även om uppsprickning inte kan förhindras, bidrar förstärkningen till att kontrollera bergmassans svällning och säkerställer på så sätt friktionen mellan blocken samt bergmassans kohesion. Förstärkningens tillbakahållande funktion är en säkerhetsaspekt, men är också viktig under förhållanden med höga spänningar för att förebygga progressiva brott i bergmassan som kan leda till stora ras. Syftet med de förankrande elementen i ett förstärkningssystem är att fästa de tillbakahållande elementen i fast berg, samt förhindra gravitativa utfall under och efter en smällbergshändelse. De förankrande elementen måste i vissa fall kunna absorbera energi för att bromsa in utstötta block, medan i andra fall måste de bara kunna deformeras utan att absorbera energi (Kaiser et al., 1995). Ett förstärkningssystem består av separata element som tillsammans uppfyller de förstärkande, tillbakahållande och säkrande funktioner som beskrevs ovan, se Figur 4.8.



Figur 4.8. Förstärkningselementens primära funktioner, från Kaiser et al. (1995).

*The primary functions of support elements, from Kaiser et al. (1995).*

De egenskaper som krävs av förstärkning som ska användas i seismiska områden beror på den roll förstärkningen ska ha samt på den storlek och skadeomfattning man förväntar sig.



tar sig av en designhändelse. Så länge seismicitetsproblemen är små, är en styv förstärkning att föredra för att förstärka bergmassan så att uppsprickning förhindras nära hålrummet. Om omfattande skador från smällberg kan förväntas, måste förstärkningen inte bara förstärka bergmassan för att förhindra svällning, utan också vara seg och kunna ge med sig. Generellt sett, så kan förankrande element vara styvare och mer hållfasta än tillbakahållande element (Kaiser et al., 1995). Tillbakahållande element har oftast låg styvhet, med undantag för sprutbetong. Nät kombinerat med sprutbetong innebär att den initiella styvheten ökar, och även när stora deformationer skett och sprutbetongen har spruckit kan systemet fortfarande ha en viss tillbakahållande kapacitet. I Tabell 4.5 sammanfattas olika förstärkningselements funktioner och egenskaper (Kaiser et al., 1995)

Tabell 4.5. Egenskaper för olika element och dess funktioner (Kaiser et al., 1995).

*Characteristics of different supports and their functions (Kaiser et al., 1995).*

Förstärkningens egenskaper	Förstärkningens funktion		
	Förstärkande	Tillbakahållande	Förankrande
Hög styvhet	Ingjuten kamjärnsbult	Sprutbetong	Ingjuten kamjärnsbult
Låg styvhet	-	Nät	Lång mekanisk bult
Hög hållfasthet	Kabelbult	Armerad sprutbetong	Kabelbult
Låg hållfasthet	Tunn kamjärnsbult	Nät	Split Set
Spröd	Ingjuten kamjärnsbult	Oarmerad sprutbetong	Ingjuten kamjärnsbult
Seg - deformerbar	Konbult	"Hönsnät"	Yielding Swellex

Förmågan att absorbera energi är en viktig egenskap som varierar för olika förstärkningselement. Deformerbara bultar kan ta upp 6-30 gånger mer energi än t.ex. kamjärnsbultar (Kaiser et al., 1995). Kombinationen nät-sprutbetong har en kapacitet att absorbera energi som är 3-5 gånger högre än enbart nät. I Tabell 4.6 summeras designvärden för bärförmåga, förskjutning och energiabsorption för några vanliga kanadensiska förstärkningselement.

Tabell 4.6. Designvärden för förstärkningselement, efter Kaiser et al. (1995).

*Design values for support elements, after Kaiser et al. (1995).*

Beskrivning	Maxlast [kN]	Max förskjutning [mm]	Energiabsorption [kJ]
Plastingjuten kamjärn (19mm)	120-170	10-30	1-4
Kabelbult (16mm)	160-240	20-40	2-6
2 m mekanisk bult (16 mm)	70-120	20-50	2-4
4 m Kabelbult (16mm)	160-240	30-50	4-8
Ingjuten slät stång (16mm)	70-120	50-100	4-10
Split Set bult	50-100	80-200	5-15
Yielding Swellex bult	80-90	100-150	8-12
Yielding Super Swellex bult	180-190	100-150	18-25
Konbult (16 mm)	90-140	100-200	10-25
#6 gauge svetsat nät, diameter 4.877 mm	24-28	125-200	2-4/m <sup>2</sup>
#4 gauge svetsat nät, diameter 5.723 mm	34-42	150-225	3-6/m <sup>2</sup>
#9 gauge ”hönsnät”, diameter 3.767 mm	32-38	350-450	3-10/m <sup>2</sup>
Sprutbetong och svetsat nät	2 x nät	< nät	3-5 x nät*

Maximal förskjutning och energiabsorption togs vid brott för bultar och vid maxlasten för nät och sprutbetong (Kaiser et al., 1995). Energiabsorption för sprutbetong och kombinationen sprutbetong-svetsat nät (\* i Tabell 4.6) gäller för deformationer på mindre än 100-150 mm. ”Gauge”-numren före näten är kopplade till wrediametern, se Tabell 4.6 ([www.screentg.com](http://www.screentg.com), och [www.twpinc.com](http://www.twpinc.com)).

Stålfiberarmerad sprutbetong (SFRS) har testats av Vervoort och Moyson (1997). De fann att SFRS hade en hög energiabsorptionsförmåga som var kopplad till längd/diameter förhållandet för fibrerna samt fibermängden. Ju högre längd/diameter kvot, desto bättre egenskaper. SFRS tålde dessutom stora deformationer utan att förlora sitt sega beteende. Vervoort och Moyson (1997) drog slutsatsen att SFRS, i kombination med ankare i form av t.ex. konbultar, kan användas där det finns risk för smällberg och smällbergsrelaterade utfall.

## 5 FALLSTUDIER: UTLÄNDSKA GRUVOR

Detta kapitel är en sammanfattning av de erfarenheter som gjorts i de fallstudier av utländska gruvor som utförts i projektet, och ligger till grund för en jämförelse med de svenska gruvorna. För utförligare beskrivningar av de studerade gruvorna hänvisas till Larsson (2004b). Gruvorna valdes ut för att de har dokumenterade erfarenheter av seismicitet, samt att de uppfyllde ett eller flera av följande kriterier:

- brytningsmetoder som är jämförbara med de svenska,
- spänningsförhållanden som liknar de skandinaviska, dvs. horisontalspänningar som är högre än vertikalspänningen, samt
- brytningsdjup som är lika stort som eller större än djupet i de svenska gruvorna.

Fyra gruvor i Kanada studerades, Fraser, Craig, Creighton, och Copper Cliff North, vilka alla har liknande bergförhållanden och i två fall samma brytningsmetod som de svenska gruvorna. Samtliga dessa gruvor ligger i Sudburyregionen. Två skandinaviska gruvor, Pyhäsalmi (Finland) och Ørtfjell (Norge), valdes ut för att de har liknande bergarter och spänningsförhållanden som de svenska gruvorna. De faktorer som studerats är spänningstillstånd, brytningsmetod, geologi och bergets egenskaper, avlastning- och förstärkningsmetodik, erfarenheter av smällberg och seismisk övervakning.

### 5.1 Spänningstillstånd

Spänningstillståndet är en av de viktigaste faktorerna för att seismicitet ska inträffa, och i de flesta av de studerade gruvorna har spänningsmätningar utförts. I de kanadensiska gruvorna varierar kvoten mellan största horisontalspänningen och vertikalspänningen från 1.5 – 2.0 beroende på djupet. Kvoten mellan minsta horisontalspänningen och vertikalspänningen är också större än 1.0. Båda dessa kvoter är antingen konstanta eller minskar med ökande djup, så att spänningstillståndet blir mer hydrostatiskt. Dessa spänningsförhållanden i kombination med brantstupande malmkroppar, relativt hårda bergarter och storskaliga brytningsmetoder leder till spänningsrelaterade problem. Ökande djup leder till ökande spänningsnivåer och också till större seismicitetsproblem. I Pyhä-

salmi är också båda horisontalspänningarna större än den vertikala, kvoten mellan största horisontalspänningen och den vertikala är 2.0 på 1125 m djup och 1.8 på 1350 m djup. I Ørtfjell är takskivan endast 30 m tjock, men tektonisk påverkan ger mycket höga horisontalspänningar vilket leder till spänningsrelaterade brott (spjälkning) och ibland små ”strain burst”. På 100 m djup är största horisontalspänningen 20 MPa och den minsta 10 MPa.

Spänningsanalys i 3D av brytningssekvenser används regelbundet i de kanadensiska gruvorna för att finna den mest fördelaktiga sekvensen med avseende på spänningar. Områden med höga spänningar är mest benägna att få smällberg i form av strain burst. I samtliga kanadensiska gruvor förekommer också glidning längs förkastningar, s.k. ”fault slip”. Förekomsten av denna typ av händelse verkar bero på djupet och utbrytningsgraden. Fault slip sker sällan i nya gruvor, utan verkar komma som ett resultat av att spänningarna störs över ett allt större område i takt med att brytningen fortskrider nedåt och utåt.

## 5.2 Brytningsmetod

Brytningsmetoderna som används i de studerade utländska gruvorna är igensättningsbrytning och olika varianter av skivpallbrytning, och i de flesta fall används fyll för att stabilisera brytningsrummen. En sammanfattning av brytningsmetoderna i de studerade gruvorna finns i Tabell 5.1. De flesta av de studerade gruvorna har brantstupande malmkroppar och malmen bröts i dagbrott innan underjordsbrytning startade. I igensättningsgruvorna sker sprängning oftast vid skiftbyten, och det är inte alltid nödvändigt att tömma hela gruvan på personal. Efter en sprängning används det seismiska övervakningssystemet för att kolla när det är säkert att gå in i det område där man nyss sprängt. När man spränger i en skivpallgruva tömmer man gruvan på personal, eftersom de stora spänningsomlagringarna som sker efter en sprängning kan orsaka smällberg. När man driver ort i områden som är seismiskt aktiva används avlastningssprängning regelbundet.

Tabell 5.1. Sammanfattning av brytningsmetoder i de utländska gruvorna.

*Summary of mining methods in mines outside Sweden.*

<b>Gruva</b>	<b>Malkropp</b>	<b>Brytningsmetod</b>	<b>Ortstorlek</b>	<b>Brytningsrummens storlek</b>
Fraser, Ni-zonen	Brant stupande, linser, malmgångar	Blasthole stoping, hydraulfyll (cement stab i primärer)	4.6 x 4.6 m	bredd: 10 m höjd: 20-30 m längd: 25 m
Fraser, Cu-zonen	Flackt stupande, malm-gångar, stupning 35-50°	Igensättning, med s.k. ”post-pillars”, hydraulfyll	4.6 x 4.6 m	I djupa malmen: 3 m bredd, 3.8 m höjd
Craig	Linser, medel 10-20 m breda, 50-150 m långa, stupning 60°	Igensättning, med . ”post-pillars”, cementstab hydraulfyll	4.6 m höjd x 11 m bredd	
Craig	Linser, medel 10-20 m breda, 50-150 m långa, stupning > 60°	Downhole-, blast-hole stoping, cementstab hydraulfyll		bredd: 10-20 m höjd: 30-35 m längd: 50-150 m
Creighton	Stupning 85°	Slot-and slash, cementstab hydraulfyll	5.3 m höjd x 5 m bredd	bredd: 11.7 m höjd: 43.3 m längd: 16.7 m
Copper Cliff North	pipformig, 100 m bred, 165 m lång	Slot-and-slash, cementstabiliserad gråbergsfyll	5.3-6 m bredd x 5.7-6 m höjd	bredd: 16.7 m höjd: 66.7 m längd: 16.7 m
Pyhäsalmi - djupmalmen	200 m bred, 420 m lång, 370 m hög	Skivpall, i primärer konsoliderad fyll, sekundärer gråbergsfyll	4.5 x 4.5 m	<u>Primära rum:</u> bredd: 20 m höjd : 25-50 m längd: 20-30 m <u>Sekundära rum:</u> bredd: 25 m höjd: 25-50 m längd: 20-30 m
Ørtfjell	100 m bred, 70-100 m hög, 2.2 km lång	Skivpall, ingen återfyllning	5.5 x 5.5 m	bredd: 35-40 m höjd: 70-100 m längd : 60 m

### 5.3 Geologi och bergets egenskaper

Malkropparna som studerats har olika ursprung, men har en enaxiell hållfasthet på 70-170 MPa. En generell observation är att det omgivande berget är något styvare och har något högre hållfasthet än malmen. En sammanfattning av bergets egenskaper i form av enaxiell tryckhållfasthet (UCS) och elasticitetsmodul (E) för de studerade gruvorna finns i Tabell 5.2. Kolumnen ”Inneslutningar” omfattar gångbergarter och linser som är smällbergsbenägna.

Tabell 5.2. Intakta bergets egenskaper i de studerade gruvorna.

*Summary of intact rock properties of studied mines.*

Gruva	Malm		Sidoberg		Inneslutningar	
	UCS [MPa]	E [GPa]	UCS [MPa]	E [GPa]	UCS [MPa]	E [GPa]
Fraser	110 - 170	57 - 58	141 - 318	42 - 84	326	97
Craig	115 - 174	44 - 73	160 - 300	50 - 74	326	97
Creighton	122	74	190 - 251	62 - 69	-	-
Copper Cliff North	150	40	150	60	200 - 240	60
Pyhäsalmi - djupet	92 - 123	98 - 139	206 - 241	68 - 76	119	63
Ørtfjell	60	30	48 - 65	18 - 24	-	-

Sammanfattningsvis, så är de styvaste bergarterna mest smällbergsbenägna (strain burst) i några av gruvorna, t.ex. i Craig, Creighton, och Copper Cliff North där styva gångbergarter eller block ofta ger strain burst. Detta stämmer inte för andra gruvor. I t.ex. Pyhäsalmi, alstras en stor del av de vibrationer ("sprak") som registreras av övervakningssystemet av pegmatitgångar, men både malmen och sidoberget är också seismiska. I Ørtfjell är det svårt att avgöra exakt var seismiciteten kommer ifrån, men "sprak" kan höras i både malm och sidoberg. För Fraser, där hållfasthets- och styvhetsintervallen överlappar för malm och sidoberg är det svårt att dra några definitiva slutsatser, eftersom seismiska händelser förekommer både i malmen och sidoberget.

#### 5.4 Avlastnings- och förstärkningsmetodik

En sammanfattning av de olika typer förstärkning och den avlastningsmetodik som används i de olika gruvorna finns i Tabell 5.3. De kanadensiska gruvorna använder liknande förstärkning både vad gäller bult- och nättyper, installation och användningsområden. Både Falconbridge och INCO har utvecklat detaljerade standarder för bultning och nätning för olika typer av orter, vilka ska ses som minimikrav. Undantag och tillägg noteras på gruvkartorna, med utförliga instruktioner för utförande. Bergmekanikerns (Ground Control Engineer) roll är mycket viktig, eftersom det är han/hon som beslutar om ändringar i standardförstärkningen är nödvändiga i ett område, t.ex. om avlastningsprängning ska utföras, och i så fall antal hål, hållängd etc. I varken Pyhäsalmi

eller Ørtfjell finns det bultstandarder; den nödvändiga förstärkningen bestäms från område till område av förmannen och den tekniska personalen.

Tabell 5.3. Sammanfattning av förstärkning och avlastning i de studerade gruvorna.

*Summary of reinforcement and destressing practices in the studied mines.*

Gruva	Förstärkningstyper	Avlastning
Fraser, Ni-zon	Bultar (mekaniska, kamjärn, Split Set, Super Swellex), nät. 1 standard	-
Fraser, Cu-zon	Bultar (mekaniska, kamjärn), nät, sprutbetongpelare. 4 standarder	-
Craig	Bultar (plastingjuten kamjärn, konbult), nät, straps, sprutbetongpelare, standard	Där det behövs, standard finns
Creighton	Bultar (mekaniska, kamjärn), nät, sprutbetong i djupa delar, standard	I alla tillredningsorter djupare än nivå 6600, ibland brytningsrum
Copper Cliff North	Bultar (mekaniska, kamjärn, kabel), nät, sprutbetong, standard	Där det behövs i orter, inga brytningsrum
Pyhäsalmi – djupa malmen	Bultar (kamjärn, Kiruna-bult, kabel), sprutbetong - med och utan fibrer, ingen standard	-
Ørtfjell	Expanderbult, sprutbetong, ingen standard	-

## 5.5 Erfarenheter av smällberg och seismisk övervakning

Erfarenheten av seismiska händelser och smällberg varierar mellan gruvorna. I Tabell 5.4 sammanfattas data om nuvarande övervakningssystem i gruvorna, största händelsens magnitud samt när händelser vanligtvis inträffar. För de kanadensiska gruvorna noteras också antalet händelser per år som rapporteras till Ontario Ministry of Labour. I Ontario måste seismiska händelser med Nuttli-magnitud större än 1.0 till 1.1, smällberg som omfattar mer än 5 ton berg, eller utfall större än 50 ton rapporteras till Ontario Ministry of Labour. Seismiska händelser eller smällberg som skadar personal eller utrustning måste också rapporteras. Detta innebär att alla gruvor i Ontario måste ha ett seismiskt övervakningssystem. Flera av de studerade gruvorna har utvecklat metoder och parametrar för att bedöma när det är säkert att återuppta arbetet i ett område efter en seismisk händelse av en viss magnitud, eller efter en produktionssalva i en skivpallgruva. Dessa metoder är baserade på data från det seismiska systemet. Några exempel på hur information från övervakningssystemet kan användas ges i Tabell 5.5.

Tabell 5.4. Sammanfattning av seismiska erfarenheter från de studerade gruvorna.

*Summary of seismic experience from studied mines.*

Gruva	Systeminformation	Största händelse	Kommentar
Fraser, Ni-zon	64 enaxiella	$M_n = 3.0 \Rightarrow$ $M_L \approx 2.7$	2-3 händelser/år med $M_n > 1.0-1.1$ ( $M_L \approx 0.5$ )
Fraser, Cu-zon	39 enaxiella, 3 triaxiella		
Craig	66 enaxiella – Craig 21 enaxiella – Onaping 3 triaxiella	$M_n = 3.0 \Rightarrow$ $M_L \approx 2.7$	35 händelser/år med $M_n > 1.0-1.1$ ( $M_L \approx 0.5$ ) 6 händelser/år med $M_n > 2.0$ ( $M_L \approx 1.6$ )
Creighton	59 enaxiella, 7 triaxiella		18 händelser/år med $M_n > 1.0-1.1$ ( $M_L \approx 0.5$ ), flesta händelser vid sprängning
Copper Cliff North	40 channels	$M_n = 3.5-3.6 \Rightarrow$ $M_L \approx 3.3$	
Pyhäsalmi – djupa malmen	12 enaxiella, 6 triaxiella, täcker 400 m djup, noggrannhet $\pm 10-20$ m	$M_L = 1.7$ , $M_L = 1.0$ *	händelser vid sprängning, pegmatitgångar
Ørtfjell	Inget system installerat	Spjälkning, $\sim 0.5$ m <sup>3</sup>	

\* the  $M_L = 1.7$  event led to installation of system, during mining  $M_L = 1.0$  events are largest

Tabell 5.5. Utvecklade parametrar och hur de används.

*Developed parameters and their use.*

Gruva	Parameter	Användning
Craig	histogram av hur seismiska aktiviteten avtar	Bedöma när det är säkert att återuppta arbetet i ett visst område
	Es/Ep-kvot	0-9 $\Rightarrow$ strain burst, >10 $\Rightarrow$ fault slip >100 $\Rightarrow$ händelse långt bort
Creighton	kumulativt seismiskt moment	Bedöma när det är säkert att återuppta arbetet i ett visst område
	kvot av P/S amplitud	<100 $\Rightarrow$ strain burst > 100 $\Rightarrow$ fault slip
Copper Cliff North	kvot av P/S amplitud	<100 $\Rightarrow$ strain burst > 100 $\Rightarrow$ fault slip

Bedömning av när det är säkert att återuppta arbetet i ett område efter en seismisk händelse är ett viktigt användningsområde. Den parameter som används för detta varierar; i Craig används histogram av hur den seismiska aktiviteten avtar, medan man i Creighton använder det kumulativa seismiska momentet. Ett annat användningsområde för data från övervakningssystemet är att avgöra vilken typ av händelse som inträffat. I Craig an-



vänds kvoten av energin för P- och S-vågorna, medan man i Creighton och Copper Cliff North använder kvoten av amplituderna för P- och S-vågorna.

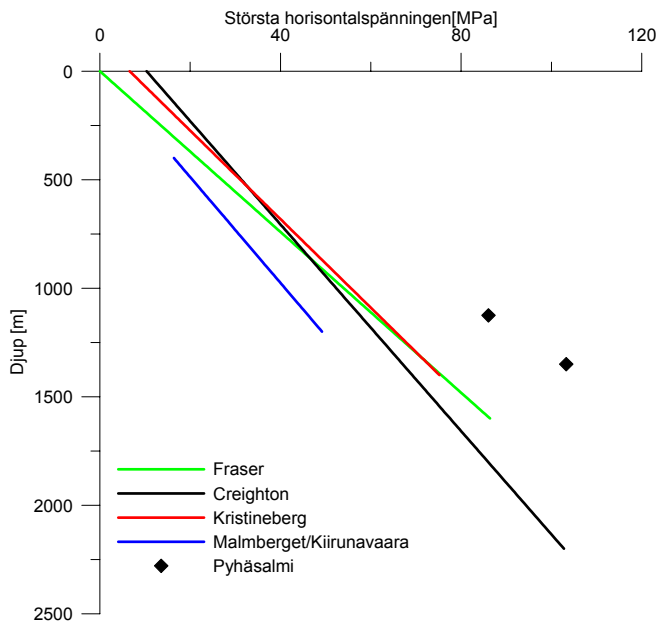


## 6 JÄMFÖRELSE OCH UTVÄRDERING AV FALLSTUDIER

I detta Kapitel jämförs de studerade svenska gruvorna med de utländska med avseende på spänningstillstånd, brytningsmetod, geologi och bergets egenskaper, avlastning- och förstärkningsmetodik, erfarenheter av smällberg och seismisk övervakning. Några metoder för att förutsäga smällberg beskrivs kort och utvärderas med avseende på möjlig användning i svenska gruvor. En sammanfattning av jämförelsen finns i slutet av kapitlet. Kristineberg, Malmberget, och Kiirunavaara har studerats i detalj, och fokus i denna jämförelse ligger på dem. Garpenberg, Renström/Petiknäs och Zinkgruvan har studerats enbart med fokus på erfarenhet av seismicitet. För en utförligare beskrivning av gruvorna hänvisas till Larsson (2004b).

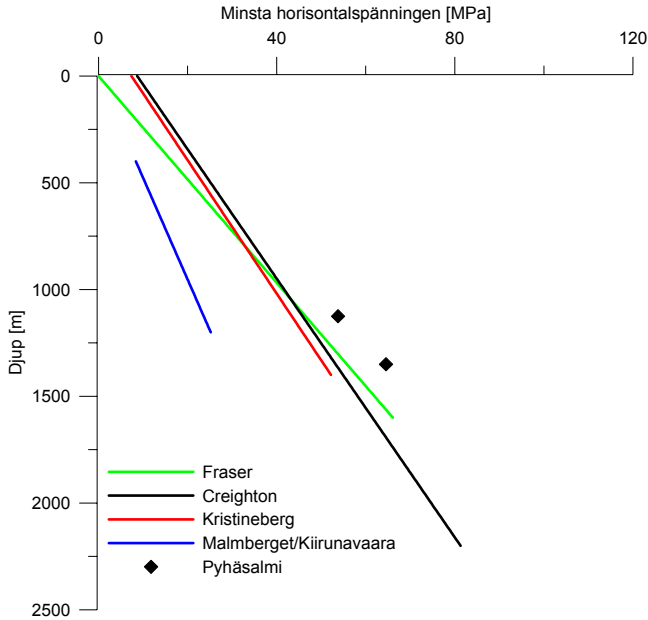
### 6.1 Spänningstillstånd

Kunskap om det primära spänningstillståndet i bergmassan är mycket viktigt. Spänningsmätningar har utförts i Kristineberg, Malmberget och Kiirunavaara och i alla tre fallen är största horisontalspänningen större än den vertikala. Kvoten mellan största och minsta huvudspänningarna och vertikalspänningen är i samma storleksordning som för de studerade utländska gruvorna. Figur 6.1 visar största huvudspänningens ökning med djupet. Sambanden för Kiirunavaara och Malmberget ger något lägre spänningar än de kanadensiska vid samma djup, medan mätningarna i Pyhäsalmi ger högre värden. Sambandet för Kristineberg visar god överensstämmelse med de kanadensiska sambanden. Figur 6.2 visar minsta huvudspänningens ökning med djupet. Återigen ger sambanden för Kiirunavaara och Malmberget något lägre spänningar än de kanadensiska vid samma djup, medan mätningarna i Pyhäsalmi och sambandet för Kristineberg överensstämmer väl med de kanadensiska sambanden.



Figur 6.1. Största horisontalspänningen mot djupet för de svenska gruvorna samt Fraser, Creighton och Pyhäsalmi.

*Major horizontal stress versus depth for the Swedish mines, the Fraser, Creighton and Pyhäsalmi mines.*



Figur 6.2. Minsta horisontalspänningar mot djupet för de svenska gruvorna samt Fraser, Creighton och Pyhäsalmi.

*Minor horizontal stress versus depth for the Swedish mines, the Fraser, Creighton and Pyhäsalmi mines.*

## 6.2 Brytningsmetod

Jämförelsen mellan de olika brytningsmetoderna avser malmkroppens storlek och form, orters och brytningsrums storlek, salvstorlek, fyll, och förstärknings- och avlastningsmetodik. De två dominerande brytningsmetoderna i Sverige är igensättningsbrytning och skivrasbrytning. Igensättningsbrytning i Kristineberg, Garpenberg och Renström/Petiknäs är i princip densamma som i de kanadensiska gruvorna. En mer detaljerad jämförelse finns i Kapitel 6.2.1. Skivpall- respektive skivrasbrytning beskrivs kortfattat i Kapitel 6.2.2 respektive 6.2.3. Skillnaderna mellan dessa två brytningsmetoder diskuteras i Kapitel 6.2.4.

### 6.2.1 Igensättningsbrytning

En sammanfattning av de brytningsmetoder som används i de studerade gruvorna presenteras i Tabell 6.1. Fraser och Craig är de två studerade kanadensiska gruvorna som använder denna metod.

Tabell 6.1. Sammanfattning av igensättningsbrytning i de studerade gruvorna.

*Summary of cut-and-fill mining as used in the studied mines.*

Gruva	Ortstorlek	Fyll och förstärkning	Seismicitet
Fraser, Cu-zon	4.6 x 4.6 m, på djupet 3 m breda, 3.8 m höga	Hydraulfyll, post-pillars, sprutbetongpelare	Nära eller från gaveln, i samband med sprängning
Craig	4.6 m höga x 11 m breda	Cementstabiliserad hydraulfyll, post-pillars, sprutbetongpelare	Nära eller från gaveln, i samband med sprängning
Kristineberg	5 m höga, i EW-malmen 5 - 15 m breda	Hydraulfyll, gråbergsfyll	Gavel och liggväggsanfang, tak
Renström/Petiknäs	5 m höga, 5 - 8 m breda	Hydraulfyll, gråbergsfyll	Nära eller från gaveln, i samband med sprängning, också vid mellanskivebrytning
Garpenberg	5 m höga, 5 - 8 m breda	Hydraulfyll, gråbergsfyll	Nära eller från gaveln, i samband med sprängning

På de djupare nivåerna i Fraser minskar ortstorleken i malmen, delvis för att minska gråbergsinblandningen och delvis för att minska stabilitetsproblemen. En genomsnittlig salva är 3-4 m. I Craig är fyllen cementstabiliserad, och ”post-pillars” lämnas i breda

brytningsrum (upp till 11 m) för att reducera det effektiva spannet, se Figur 6.3. Seismiciteten inträffar oftast i eller i närheten av ortgaveln och ofta i samband med sprängning.



Figur 6.3. Typisk ”post pillar”, förstärkt med nät och bultar.

*Typical post pillar, reinforced by mesh straps and bolt.*

Den största skillnaden mellan svenska och kanadensiska gruvorna är att ortbredden varierar mer i de svenska gruvorna, från 5 m till 15 m. I de svenska gruvorna är hydraulfyll vanligast, men gråberg används när det finns till hands. I Kristineberg är seismicitet vanligt i liggväggsanfang och i taket närmast fronten. I Garpenberg sker också de flesta händelserna i fronten, och i Renstöm/Petiknäs inträffar seismicitet i samband med sprängning och mellanskivebrytning.

Mängden berg som sprängs i varje salva påverkar den mängd seismisk energi som finns tillgänglig. Inkrementell brytning minskar den mängd energi som kan avges som seismiska vågor, men salvorna skulle behöva vara kortare än 1 m för att ge en signifikant minskning av den tillgängliga energin. Hedley (1992) studerade numeriskt energikomponenterna vid inkrementell brytning och kom fram till att i ett brytningsrum som var 3 m brett, 30 m högt, och som bröts i 3 m höga skivor så utgjorde seismisk energi 72 % av den totala energin, se vidare Kapitel 2.4. En minskning av skivhöjden till 1 m

visade att 59% av totala energin fortfarande var seismisk energi. Detta innebär att varken salvlängden (3-4 m) eller skivhöjden (3-5 m) i igensättningsbrytning kan anses vara inkrementell. Att minska salvlängden eller skivhöjden för att minska mängden tillgänglig energi är varken effektivt eller bra för produktionen, så man får minska mängden tillgänglig seismisk energi på annat sätt.

Fyll har många positiva egenskaper; den ger stöd för brytningsrummets väggar och förhindrar progressiva brott, den minskar brytningsrummens konvergens, och den absorberar energi som frigörs vid seismiska händelser. Återfyllning bör därför övervägas i gruvor som är seismiskt aktiva och där man har en brytningsmetod som medger detta. I samtliga studerade gruvor med skivpallbrytning, förutom Ørtfjell, används återfyllning. De kanadensiska igensättningsgruvorna använder cementstabiliserad fyll till stor del, medan de svenska främst använder hydraulfyll och gråberg. I kopparzonen i Fraser konstrueras ibland sprutbetongpelare för att stabilisera taket och förhindra konvergens.

Sammanfattningsvis så är det inga större skillnader mellan Kristineberg och de kanadensiska gruvorna vare sig i spänningstillstånd eller brytningsmetod, vilket innebär att samma typer av seismicitetsproblem kan förväntas med ökande brytningsdjup. Spänningsnivåerna i Renström-/Petiknäs är i genomsnitt lägre än i Kristineberg på samma djup (Marklund, 2004), så seismicitetsproblemen borde blir mindre allvarliga. Spänningstillståndet i Garpenberg har inte studerats närmare här, men för närvarande (2004) verkar seismicitet mest inträffa vid mellanskivebrytning, vilket indikerar att bergarterna är hårda och spröda vilket kan leda till ökad seismicitet med ökande brytningsdjup.

### **6.2.2 Skivpallbrytning**

Skivpallbrytning används i massiva malmkroppar med ungefär samma utsträckning i båda horisontalriktningarna. Malmkropparnas höjd varierar, men minimihöjden är ca 100 m. I samtliga studerade kanadensiska gruvor och även i Pyhäsalmi används cementstabiliserad fyll åtminstone i de primära brytningsrummen. I de sekundära kan fyllen bestå av hydraulsand eller gråberg. I Ørtfjell lämnas rummen öppna, och istället avsätts pelare för att säkerställa taksnivåns stabilitet. I de gruvor som först bröts som dagbrott

förhindrar fyllen och takskivan att det ursprungliga dagbrottet utvidgas, vilket minskar gruvans påverkan på de regionala spänningsförhållandena. Zinkgruvan är den enda av de studerade gruvorna i Sverige som använder sig av skivpallbrytning, och där har det visat sig att seismiciteten minskat efter att man började använda stabiliserad återfyll. Idag används s.k. paste fill för att återfylla brytningsrum i båda malmkropparna (Askemur, 2004).

Seismicitet förekommer både i sidoberget och i malmen i de studerade gruvorna. I malmen är det styva inneslutningar i form av gångbergarter som är mest seismiska. Det verkar inte vara någon skillnad i seismisk aktivitet eller typ av händelse mellan produktionsområden och transportorter.

I skivpallgruvor är produktionsområdena utsatta för höga spänningar och är ofta seismiskt aktiva. Eftersom en stor del av seismiciteten sker direkt efter sprängning, kan det vara bra ur seismisk synvinkel att spränga stora salvor. Ingen personal tillåts vara underjord i samband med produktionsprängning, så när spränggaserna ventilerats ut har största delen av spänningsomlagringarna redan skett. En typisk produktions salva är på 4000 - 5000 ton.

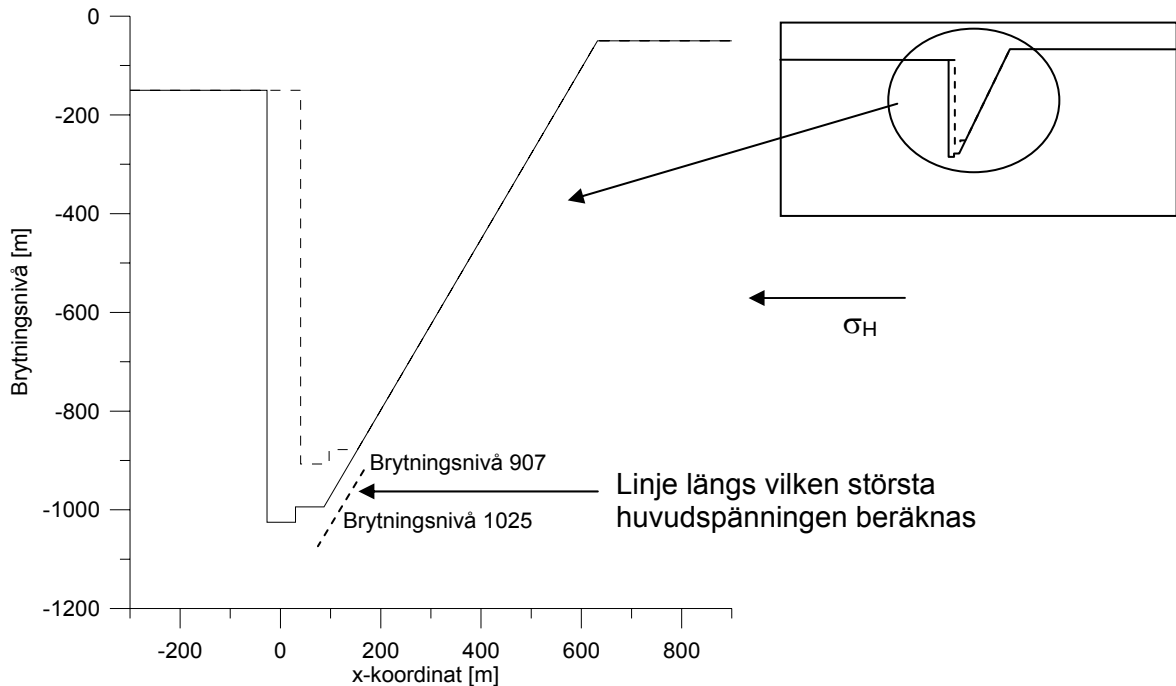
### **6.2.3 Skivrasbrytning**

Skivrasbrytning används främst i stora malmkroppar. Malmkroppen i Kiirunavaara är speciell eftersom den är 4 km lång, ca 80 m bred och har ett känt djup på ca 2 km. Malmkroppens form i kombination med det rasområde som bildas av brytningsmetoden, stör det horisontella spänningsfältet över ett stort område. Några av malmkropparna i Malmberget startar på djupet vilket innebär att en takskiva lämnas. Takskivan minskar i tjocklek med ökande brytningsdjup, till följd av ett progressivt brott som orsakas av att hålrummet ovanför rasmassorna inte återfylls. Samma sak gäller för den norra delen av malmkroppen i Kiirunavaara, den så kallade Sjömalmen.

För att studera hur den utbrutna delen av malmkroppen och ett ökat brytningsdjup påverkar en liggväggsort kan en modell som i Figur 6.4 användas. Rasmassorna har låg



styvhet jämfört med det omgivande berget och har därför en försumbar påverkan på spänningarna under raset, så rasmassorna ersätts med tomrum i modellen. I analysen tas inte effekten av utbrytning av själva orten med, istället beräknas största huvudspänningen i planet längs en linje genom den tänkta ortens centrum, se Figur 6.4.



Figur 6.4. Modell av hur raset utvecklas vid en ökning av brytningsdjupet från nivå 907 till 1025 i Kiirunavaaragruvan.

*Model of cave resulting from an increase in mining depth from level 907 to level 1025 in the Kiirunavaara mine.*

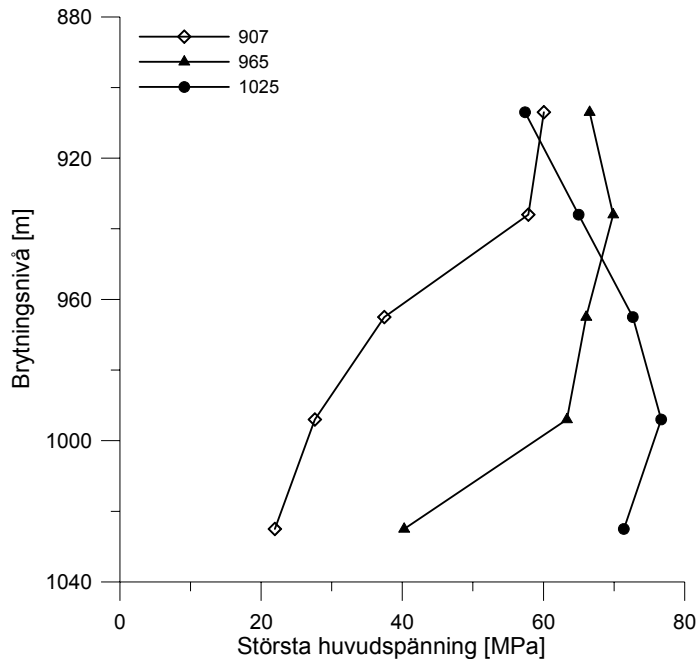
Analysen antar en oändligt lång malmkropp i förhållande till bredden, vilket stämmer väl för Kiirunavaara. Modellen är elastisk och utförd i Examine 2D (Curran och Corkum, 1996). Resultaten för nivåerna 907, 965 och 1025, när brytningen går från nivå 907 till 1025, visas i Figur 6.5. Primärspänningarna i modellen är enligt Sandström (2003):

$$\sigma_1 = 0.041z \quad 6-1a$$

$$\sigma_2 = 0.031z \quad 6-1b$$

$$\sigma_3 = 0.021z \quad 6-1c$$

där  $\sigma_2$  motsvarar den teoretiska vertikalspänningen med hänsyn tagen till malmens densitet,  $\sigma_1$  är den största horisontalspänningen orienterad vinkelrätt mot malmkroppen, och  $\sigma_3$  är minsta horisontalspänningen orienterad parallellt med malmen. Dessa samband gäller för djup ( $z$ ) större än 400 m.



Figur 6.5. Största huvudspänningen i liggväggsortens läge för Kiirunavaara.

*Major principal stress at the center of footwall drifts in the Kiirunavaara mine.*

Spänningarna beräknades när brytningen backat ut halvvägs till liggväggen. Orten på nivå 965 beskrivs här, men samma mönster kan ses för alla nivåer. Ortens läge utsätts för en ökande största huvudspänning med ökande brytningsdjup. Spänningen når sitt största värde (70 MPa) när brytningen är på nivå 936, se Tabell 6.2. Med fortsatt ökande brytningsdjup så minskar spänningen i ortläget. Ju djupare orten är belägen desto högre blir den största spänningen. En jämförelse med de primära spänningarna på nivå 965, vilket motsvarar 825 m under markytan, kan göras genom att använda de spänningssamband som presenterats av Sandström (2003). I Kiirunavaara är det den största horisontalspänningen som är orienterad vinkelrätt mot malmen, vilket ger att spänningen på 825 m djup blir 34 MPa. Brytningsmetoden ökar alltså beräknad elastisk spänning på en

viss nivå ungefär med en faktor 2. Beroende på om det är största eller minsta horisontal-spänningen som är orienterad vinkelrätt malmen kan spänningskoncentrationsfaktorn variera mellan 2 och 2.5.

Tabell 6.2. Största huvudspänningen beräknad för några nivåer i Kiirunavaara.

*Maximum principal stress calculated for some levels in the Kiirunavaara mine.*

Brytningsnivå	Spänning för varje ortnivå [MPa]		
	907	965	1025
907	60	67	57
936	58	70	65
965	37	66	73
994	27	63	77
1025	21	40	71

En produktionssalva i en skivrasgruva är på ca 10000 ton. De största spänningskoncentrationerna för liggväggsorten inträffar ca 20-30 m nedanför rasets botten. Eftersom produktionsorterna huvudsakligen är orienterade parallellt med största huvudspänningen (i Kiirunavaara) så är dessa orter troligen inte de mest kritiska beträffande seismicitet. Tillredningen däremot sker under höga spänningar och i liggväggsorterna på dessa nivåer har spjälkning från anfang och tak noterats. Eftersom det mesta av seismiciteten sker i liggväggsorterna i både Malmberget och Kiirunavaara så påverkar produktions-salvans storlek troligen inte seismiciteten särskilt mycket. En av huvudorsakerna till detta kan vara att malmen är relativt seg jämfört med omgivande berg.

Seismicitet i en skivrasgruva kan ske på två sätt. Vid tillredning, vilket sker två nivåer under rasets botten kan seismicitet inträffa som en följd av kombinationen av höga spänningar och spröda bergarter. Denna typ av seismicitet är troligen en följd av energifrigörelse orsakad av volumetrisk konvergens och den högsta intensiteten inträffar direkt efter sprängning. Seismicitet i liggväggsorterna kan också inträffa som en följd av spänningsomlagringar orsakade av att raset ökar i storlek. När utbackning pågår på produktionsnivån skärs spänningarna av vid hängväggen och tvingas nedåt, vilket så

småningom påverkar spänningarna på liggväggsortens rand. Om en seismisk händelse inträffar eller inte beror på bergets egenskaper.

#### **6.2.4 Jämförelse mellan skivpall- och skivrasbrytning**

I samtliga studerade kanadensiska gruvor med skivpallbrytning och även i Pyhäsalmi används cementstabiliserad fyll i de primära brytningsrummen och hydraulsand eller gråberg i de sekundära rummen. Enda undantaget är Ørtfjell där man inte återfyller alls, utan istället avsätter pelare mellan rummen för att säkerställa taks kivans stabilitet. I de gruvor som ursprungligen bröts som dagbrott samverkar taks kivan och fyllen till att förhindra en ökning av dagbrottets area när brytningsdjupet ökar, vilket leder till att horisontalspänningarna störs mindre än i området kring en skivrasgruva. Pyhäsalmi startade som en dagbrottsgruva som senare övergick till brytning under jord, men malmkroppen är ganska smal ner till ett djup av 1000 m, så störningen av horisontalspänningarna orsakad av den utbrutna malmkroppen är troligen försumbar i den djupa malmen.

Effekterna av brytning av malmkroppar i Malmberget liknar de för skivpallbrytning, eftersom malmkropparnas form är liknande. Den störda zonen är fortfarande större där malmkropparna först bröts i dagbrott, men den regionala spänningsomlagringen är lika. I Malmberget förekommer strain burst i liggväggsorterna men inte i produktionsorterna, medan strain burst i skivpallgruvorna förekommer främst i brytningsrum samt orter i närheten av dessa. Flera utbrutna malmkroppar kan samverka och störa spänningsfältet.

Slutsatsen av detta är att dessa två brytningsmetoder inte är direkt jämförbara, men att man kan dra nytta av de erfarenheter man gjort i skivpallgruvorna och till stor del använda dem direkt i skivrasgruvorna. Spänningssambanden för Malmberget och Kiiruna-vaara ger något lägre spänningar än i de kanadensiska gruvorna på samma djup, men den större störningen av spänningsfältet kan förväntas ge ökade seismicitetsproblem speciellt i liggväggsorterna med ökande brytningsdjup.

### 6.3 Geologi och bergets egenskaper

Enaxiell tryckhållfasthet (UCS) och elasticitetsmodul (E) för malm och sidoberg i de studerade svenska gruvorna presenteras i Tabell 6.3. Kolumnen "Seismiskt berg" består av de mest seismiskt aktiva bergarterna för varje gruva – för Kristineberg sericit-kvartsit, för Malmberget aplit och rödgrå leptit och för Kiirunavaara syenitporfyr (SP4).

Tabell 6.3. Egenskaper för bergarter i de studerade svenska gruvorna.

*Properties of rock types in studied Swedish mines.*

Gruva	Malm		Sidoberg		Seismiskt berg	
	UCS [MPa]	E [GPa]	UCS [MPa]	E [GPa]	UCS [MPa]	E [GPa]
Kristineberg	88 - 155	-	5 - 304	-	44 - 188	-
Malmberget	84 - 137	-	84 - 270	34 - 72	99 - 245	62*
Kiirunavaara	135 - 185	-	90 - 430	60 - 80	430	80

\* motsvarar  $E_{50\%}$  för rödgrå leptit (UCS 245 MPa). Inget värde fanns tillgängligt för aplit (UCS 99 MPa).

Som noterades för de utländska gruvorna så är det inte alltid de styvaste och hårdaste bergarterna som är mest smällbergsbenägna (strain burst). I Kristineberg har kvarts den högsta hållfastheten (UCS 159 MPa), men det är sericit-kvartsit som är mest seismiskt aktiv (UCS 110 MPa). Inga E-moduler fanns tillgängliga för dessa bergarter, så styvheterna kan inte jämföras. Anledningen att UCS och E valdes för jämförelsen, är att spjälkning förekommer vid spänningsnivåer nära den enaxiella tryckhållfastheten, samt att deformationerna är elastiska fram till initiering av spjälkbrott. Dessa två egenskaper finns också oftast med vid gruvbeskrivningar.

En viktig faktor att ta hänsyn till är geologiska strukturers läge både i gruvan och i den omgivande bergmassan. När brytningen fortskrider kan förkastningar aktiveras, och konsekvenserna av en glidning kan bli katastrofala. I de flesta av de kanadensiska gruvorna genomkorsas brytningsområdet av förkastningar, och de största händelserna som skett är lokaliserade längs dem. När man planerar brytningen, så bör man börja vid förkastningen och bryta sig bort från den. Om detta inte är möjligt, måste man dimensionera förstärkningen med tanke på dynamiska förlopp.

## 6.4 Förstärknings- och avlastningsmetodik

De olika typer av förstärkning som används i de studerade gruvorna sammanfattas i Tabell 6.4. Inkluderat finns också en kolumn som anger om gruvan regelbundet använder sig av någon form av avlastning.

Tabell 6.4. Sammanfattning av förstärkning och avlastning som används i de studerade gruvorna.

*Summary of reinforcement and destressing used in the studied mines.*

Gruva	Bult typ				Annan	Ytförstärkning		Avlastning
	Kamjärn	Mek.	Frik.	Kabel		Nät	Sprutbtg.	
Fraser, Ni	x	x	x	x		x		
Fraser, Cu	x	x		x	x <sup>2</sup>	x		
Craig	x				x <sup>1, 2, 3</sup>	x		x
Creighton	x	x				x	x	x
CC North	x		x	x		x	x	x
Pyhäsalmi	x	x		x			x	
Ørtfjell		x					x	
Kristineberg	x						x	
Malmberget	x					x	x	
Kiirunavaara	x	x		x		x	x	

Mek. – mekaniska bultar bolts (t.ex. Kirunabult), Frik. – friktions bult (t.ex., Swellex, Split Set), <sup>1</sup> – straps  
<sup>2</sup> – sprutbetongpelare, <sup>3</sup> - konbult

### 6.4.1 Förstärkningsmetodik

Typisk förstärkning av en ort i en svensk gruva består av 2-3 m långa plast eller cementingjutna kamjärnsbultar och 3-5 cm sprutbetong, se Tabell 6.4, vilket ger en relativt styv förstärkning. Kamjärnsbultarna har bra egenskaper under statisk belastning och deformation parallellt med bultens axel, men vid dynamiska belastning kan bulten dras igenom brickan. Sprutbetongen är en ytförstärkning, som är relativt styv och spröd, men som kan göras segare genom fiberarmering. Denna förstärkningskombination förstärker bergmassan och bidrar till att förhindra att brott uppstår. Hittills har denna förstärkning varit tillräcklig för att minimera skador orsakade av seismicitet, men om en händelse med högt energiinnehåll skulle inträffa skulle stora skador kunna uppstå eftersom förstärkningen är styv. För att förbättra de dynamiska egenskaperna så bör fiberarmerad sprutbetong användas, och kamjärnsbultarna bör kompletteras med bultar som kan ta

upp mer energi. I Kanada används friktionsbultar och mekaniska bultar i kombination med kamjärnsbultar och nät för att ge en förstärkning som både klarar hög statisk och dynamisk belastning. Sprutbetong används för att förbättra stabiliteten i borrhörter vilka utsätts för höga spänningar och stora vibrationer i samband med produktionssprängning.

#### **6.4.2 Avlastningsmetodik**

Det är svårt att mäta effekten av avlastningssprängning, och det är också svårt att direkt jämföra en avlastad ort med en annan, eftersom bergförhållandena aldrig kan bli exakt desamma, och dessutom kan påverkan från andra orter och brytningsrum variera. Avlastningssprängning av tillredningsorter verkar ofta ge önskat resultat (Brummer och Blake, 1998), vilket även noterats i några av de kanadensiska gruvor som regelbundet avlastningsspränger (Creighton och Copper Cliff North). Tidigare försök med avlastningssprängning av orter i Sverige har också minskat seismiciteten i bl.a. Malmberget, Näsliden, och Laisvall gruvorna (Borg, (1988), Krauland och Söder (1988)), men för närvarande används det inte i någon svensk gruva. I Fraser används inte avlastningssprängning, och i Craig används det när det anses nödvändigt. Försök med avlastningssprängning av brytningsrum har gjorts i Creighton, med varierande resultat.

Försök med borrhöring av grovhål för att avlasta anfangen mot fronten har gjorts i Kristineberg, men var svårt att implementera eftersom det var svårt att bevisa metodens effektivitet. När hålen borrades korrekt, verkade seismiciteten minska.

För att förbättra spänningsfördelningen runt en ort kan man förändra tvärsnittet. I Craig, ändrar man det rundade taket till ett platt på vissa djup, när orten är orienterad vinkelrätt mot största horisontalspänningen. De skarpa hörnen koncentrerar spänningarna dit, och avlastar taket, vilket minskar risken för s.k. ”strain burst” i gavel och anfang.

I de gruvor där seismicitet främst uppträder under ortdrivning, bör man pröva olika avlastningsmetoder och utvärdera deras effektivitet. Liggväggsorterna i Malmberget och

Kiirunavaara är ofta seismiskt aktiva, vilket skulle kunna minska med någon typ av avlastning.

## 6.5 Erfarenheter av smällberg och seismisk övervakning

De två typer av brottmekanismer som kommer att behandlas här är strain burst och fault slip. Tabell 6.5 är en sammanfattning av förekomsten av de två brottmekanismerna och den största händelsens magnitud för de studerade gruvorna. Magnituder för gruvor utan seismiskt övervakningssystem har uppskattats utifrån Tabell 4.4, som relaterar magnituden till hur händelsen kändes i gruvan (Hudyma, 2004).

Tabell 6.5. Sammanfattning av brottmekanismer i de studerade gruvorna.

*Summary of failure mechanisms in the studied mines.*

Gruva	Strain burst	Fault slip	Största händelse	Kommentar
Fraser	x	x	$M_L = 2.7$	
Craig	x	x	$M_L = 2.7$	
Creighton	x	x	$M_L = 3.7$	Fault slip, brytningsområde och schakt stängdes
CC North	x	x	$M_L = 3.3$	
Pyhäsalmi	x		$M_L = 1.7$	Ledde till investering i seismiskt system
Ørtfjell	x			$M_L = -3 - -2$
Kristineberg	x		$M_L = 0$	$M_L = -3$ medel
Malmberget	x	x*	$M_L = 2.4$	$M_L = 0 - 1$ , kändes på ytan
Kiirunavaara	x		$M_L = 1.2$	Inga skador
Garpenberg	x		$M_L = -1 - 0$	Hördes på ytan, brott i
Renström/ Petiknäs	x		$M_L = -2$	$M_L = -3$ medel
Zinkgruvan	x	x		$M_w = 2.6$ , inga skador

\* misstänkt fault slip

Strain burst är den vanligaste typen av händelser och den som normalt uppträder först. Händelser av fault slip-typ börjar inträffa när det störda området sträcker sig bortanför de direkta brytningsområdena. Denna störning kan orsaka lokalt minskade normalspänningar eller ökade skjuvspänningar på förkastningar, vilket kan leda till att glidning initieras. Den största händelse som inträffat i någon de studerade gruvorna var en fault slip med en Richtermagnitud på 3.7 (Nuttlimagnitud 4.0). De skador som kopplas till händelser av strain burst-typ är spjälkning, som ibland kan åtföljas av utstötning av skivor



eller block. Skador som förknippas med fault slip kan vara allt från utstötning av små block till att en hel ort kollapsar. Det kan vara svårt att utifrån den skada som skett avgöra vilken typ av händelse som inträffat

### **6.5.1 Erfarenheter av smällberg**

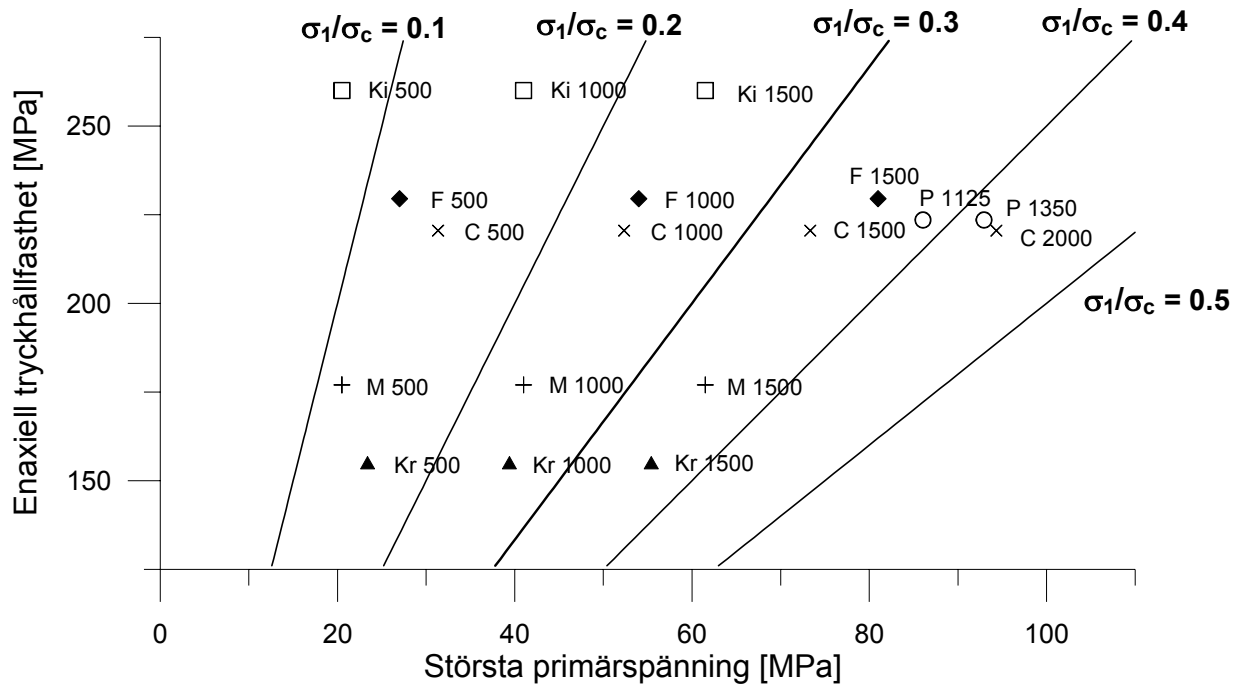
#### ***Strain burst***

Strain burst inträffar i samtliga studerade gruvor, men antalet händelser per dag och magnituderna varierar. I de svenska gruvorna är magnituderna ännu låga, och skadorna begränsade, med största blockstorlek ca 1 m<sup>3</sup>. I Kristineberg är det vanligt att bergfragment spjälkas av från gaveln vid skrotning, men inga större block har hittills stötts ut. I både Malmberget och Kiirunavaara har några strain burst med högre magnituder inträffat, men dessa har hittills inte skadat varken personal eller utrustning. I Garpenberg och Renström/Petiknäs förekommer också strain burst, främst i samband med sprängning och när mellanskivor går i brott.

I Pyhäsalmi hade den största strain burst händelsen hittills en magnitud på ca 1. Seismicitet förekommer främst i samband med sprängning, och skadorna är begränsade till spjälkning av tak och väggar i orter i närheten av brytningsrummet. Pegmatitgångar är också en källa till seismicitet som resulterar i spjälkning av pegmatiten. I Ørtfjell förekommer strain bursts inte särskilt ofta, och skadorna är vanligen begränsade. I de kanadensiska gruvorna förekommer strain burst ofta i samband med en geologisk störning, t.ex. ett styvt block omgivet av mindre styvt berg, eller när en styv gångbergart korsar en ort.

Hoek och Brown (1982) använde en plot av UCS mot största primärspänningen vid brott för att indikera när brott i väggen (spjälkning) inträffade i kvadratiska orter i Sydafrika. Samma metod användes av Martin et al. (2001) för att uppskatta skadan på nivå 420 i Äspö och URL 420. I Figur 6.6 plottas kvoten av största primärspänningen och UCS för olika djup för Fraser, Creighton, Pyhäsalmi, Kristineberg, Malmberget och Kiirunavaara. Spänningen antas verka i planet vinkelrätt mot en ort. Den spänningsterminologi som används här är samma som Hoek och Brown (1982) använde. Bryt-

ningsmetodens påverkan på spänningarna tas inte med här, och figuren ger endast en indikation av potentialen för strain burst. För samtliga gruvor användes medelvärden av enaxiella tryckhållfastheten för sidoberget, se Tabell 6.6. Tolkningen av de olika intervallen för kvoten  $\sigma_1/\sigma_c$  finns i Tabell 6.7 (Hoek och Brown, 1982).



Figur 6.6. Kvoten  $\sigma_1/\sigma_c$  för några av de studerade gruvorna.

*$\sigma_1/\sigma_c$  ratio for some of the studied mines.*

Tabell 6.6. Värderna för enaxiell hållfasthet för sidoberget som använts i figuren.

*Values of unconfined compressive strength for sidewall rocks used in plot.*

Gruva		UCS [MPa]	
		min-max	medel
Fraser	F	141 - 318	229.5
Creighton	C	190 - 251	220.5
Pyhäsalmi	P	206 - 241	223.5
Kristineberg	Kr	5 - 304	154.5
Malmberget	M	84 - 270	177
Kiirunavaara	Ki	90 - 430	260

Tabell 6.7. Tolkning av kvoten  $\sigma_1/\sigma_c$ , efter Hoek och Brown (1982).*Interpretation of  $\sigma_1/\sigma_c$  – ratio, after Hoek and Brown (1982).*

$\sigma_1/\sigma_c$	Tolkning
$\sigma_1/\sigma_c = 0.1$	Elastisk respons, stabil oförstärkt tunnel
$\sigma_1/\sigma_c = 0.2$	Begränsad spjälkning inträffar
$\sigma_1/\sigma_c = 0.3$	Kraftig spjälkning inträffar
$\sigma_1/\sigma_c = 0.4$	Kraftig förstärkning krävs för att hålrummet ska förbli stabilt
$\sigma_1/\sigma_c > 0.5$	Smällberg (rockburst) kan inträffa

Nuvarande brytningsdjup i Malmberget och Kiirunavaara är ca 600 m under markytan. Enligt Figur 6.6 och Tabell 6.7 borde begränsad spjälkning ( $\sigma_1/\sigma_c = 0.2$ ) först börja inträffa vid ca 1200 m djup i Kiirunavaara och vid ca 800 m djup i Malmberget. Detta stämmer ungefär överens med observationer i Malmberget, men stämmer inte alls för Kiirunavaara där spjälkning redan inträffar. Effekten av brytningsmetoden är att öka spänningarna med en faktor 2, vilket skulle ge en bättre överensstämmelse för Kiirunavaara. För Kristineberg överensstämmer figuren och observationerna väl. Denna sorts figur skulle kunna vidareutvecklas för varje gruva, så att man tar hänsyn till olika bergarter, lokala spänningsförhållanden, och de skador man observerat efter seismiska händelser. Denna jämförelse med de kanadensiska gruvorna, indikerar att man på grund av likheterna i spänningstillstånd och bergförhållanden bör förvänta sig ökad daglig seismicitet och större händelser i de svenska gruvorna med ökande brytningsdjup.

### ***Fault slip***

I de kanadensiska gruvorna förekommer ofta glidning längs strukturer, s.k. "fault slip". Det finns vanligen flera förkastningar som korsar brytningsområdena, men deras läge är välkänt, så hänsyn kan tas till dem vid brytningsplaneringen. Glidning kan fortfarande inträffa, eftersom samverkan mellan brytningsrum eller hela brytningsområden kan aktivera tidigare inaktiva förkastningar. Dessa typer av händelser orsakar de största skadorna som utstötning av block och stora ras på grund av vibrationerna. För Pyhäsalmi och Ørtfjell fanns ingen information tillgänglig om förkastningar i närheten av gruvorna.

I Malmberget har man nyligen haft några händelser som misstänks vara fault slip. Dessa händelser orsakade inte skada på underjordskonstruktionerna, men var stora nog att kännas på ytan. Några kända förkastningar korsar gruvan, men ingen av dessa mynnar i något hålrum som kan nås, så det är svårt att bedöma om någon rörelse har skett längs dem. I Kiirunavaara och Kristineberg finns inga kända större aktiva förkastningar i närheten av gruvorna.

### **6.5.2 Seismisk övervakning**

Användning av data från det seismiska systemet för att kalibrera numeriska modeller är vanligt i mekaniserade gruvor i hårt berg i både Australien och Nordamerika (Potvin and Hudyma, 2001). I de kanadensiska gruvorna kalibreras ofta modeller av brytningslayoutens eller brytningssekvensens påverkan på spänningarna mot den seismicitet som det brytningssteget orsakade. Där modellen indikerar höga spänningar är det troligt att seismicitet kommer att inträffa. Analys av källparametrar kan vara mycket värdefullt, men kräver mycket tid och resurser. Stora datavolymer behövs, och variationer i källparametrarna måste studeras över begränsade områden, genom att isolera enskilda källor och källmekanismer. Ett exempel är en studie av Alcott et al. (1998), där tidsberoende ökningar i seismiskt moment och seismisk energi korrelerades mot stora ras som inträffat i gruvan. De data som användes valdes ut för hand, vilket säkerställer en hög kvalitet, men kräver expertis och tid. I gruvorna är det vanligtvis bara en person som ansvarar för det seismiska systemet, och det är ofta en ingenjör med begränsad tid för analyser. För att kunna utföra denna typ av seismologisk analys rutinmässigt, är det nödvändigt att systemets automatiska val av första ankomst (av P- och S-vågor) förbättras, samtidigt som bättre automatiska verktyg för att göra en första bedömning av viktiga parametrar utvecklas. Av de studerade gruvorna är det Craig, Creighton, samt Copper Cliff North som har använt data från övervakningssystemet för att utveckla metoder för bestämning av när det är säkert att återuppta produktionen, samt metoder att avgöra vilken typ av händelse som inträffat.

Sammanfattningsvis så är ett seismiskt övervakningssystem en investering värd att överväga för gruvor som är seismiskt aktiva. Systemet övervakar inte enbart seismiska

händelser, utan också hur bergmassan beter sig vid brytning. Brytning av mellanskivor kan övervakas och effekten av en ändring i brytningsmetod kan kvantifieras med avseende på seismicitet.

## 6.6 Utvärdering av metoder för att förutsäga seismicitet

En korrekt förutsägelse av läget, tidpunkten, och storleken av en händelse skulle öka säkerheten och minska produktionsbortfall orsakade av produktionsstopp och förlust av orter och brytningsrum. Ett antal metoder har utvecklats för att beskriva och förutsäga seismicitet; t.ex. *ERR*, *ESS*, *VESS*, *Departure Indexing Method*, *MGW*, *LERD*, och *SHS*. *ERR*, *ESS*, *VESS*, samt *SHS*, kan beräknas utan tillgång till seismiska data, men de beräknade värdena för *ERR*, *ESS*, och *VESS*, kan inte användas för riskbedömning utan erfarenhet och kvantitativ information för den studerade gruvan. Dessa metoder används för att utvärdera effekterna av ett planerat brytningssteg, och kan också användas för tillbakaräkning av seismiska händelser om man har seismiska data. *SHS* används för att bedöma risken för seismiska händelser för en hel malmkropp eller gruva. *Departure Indexing Method*, *MGW*, och *LERD*, använder numerisk analys i kombination med seismiska data från ett brytningssteg för att förutsäga områden där seismiska händelser kan inträffa i framtiden. Dessa metoder kan också användas för att identifiera seismiska riskområden i gruvan. Samtliga dessa metoder har utvecklats för att förutsäga smällberg, och man kan få en relativt god uppfattning om var smällberg kan komma att inträffa utifrån seismisk historik i kombination med spänningsanalys, men tidpunkten för händelsen är inte möjlig att förutsäga. För en utförligare beskrivning av metoderna hänvisas till Larsson (2004a). Denna utvärdering fokuserar på möjligheterna att använda metoderna i Sverige med avseende på typer av malmkroppar, brytningsmetoder och vad metoden i sig själv kräver för indata.

*ERR* (Energy Release Rate) utvecklades för longwall mining i tabulära malmkroppar i en bergmassa med väldigt få sprickor. Huvudentagandet är att den frigjorda energin är direkt kopplad till den volymetriska konvergensen, vilket innebär att *ERR* enbart kan användas för att förutsäga strain burst. Svenska malmkroppar har ofta oregelbunden form, och bergmassan är ofta uppsprucken. Spännings- och energimodellering i 3D av

ett planerat brytningssteg, skulle kunna ge en uppfattning om vilken brytningssekvens som frigör minst seismisk energi. För att kunna förutsäga riskområden måste man kalibrera beräkningarna mot registrerade seismiska händelser samt motsvarande karterade skador. Skadorna orsakade av en händelse måste korreleras mot det beräknade *ERR*-värdet för det brytningssteget. Ett exempel på ett sådant samband mellan *ERR*, antal händelser som orsakar skador, och bergförhållanden utvecklades av Jaeger och Cook (1979) för longwall gruvor i Sydafrika.

*ESS* (Excess Shear Stress) utvecklades av Ryder (1988) för Sydafrikanska förhållanden, men förutsätter ingen speciell typ av malmkropp. Metoden används för att förutsäga glidning längs förkastningar. Numerisk analys av ett visst brytningssteg används för att finna områden med ett överskott av skjuvspänningar. *ESS*-värdet där glidning inträffade måste kalibreras mot bergmassan i fråga, men de värden som Ryder föreslog kan användas för en första uppskattning. För att kunna använda metoden för att identifiera stora diskontinuiteter där glidning kan inträffa, måste man ha seismiska data, känna till var aktiva förkastningar finns och hur de beter sig, samt veta var förkastningar som kan reaktiveras finns. *VESS* (Volume Excess Shear Stress) är en vidareutveckling av *ESS*, så samma antaganden gäller (Spottiswoode, 1990). För att kunna användas kräver denna metod kunskap om en förkastnings seismiska beteende, något som inte är känt i svenska gruvor idag.

*Departure indexing method* (Poplawski, 1997a, b) utvecklades i Australien för att användas i malmkroppar med oregelbunden form, och där seismiska händelser ofta föregås av kraftiga variationer i seismiska och statistiska parametrar. Denna metod kräver att seismiska parametrar mäts kontinuerligt och att man lagrar alla data i en databas, så att värden som avviker från det normala kan upptäckas. Metoden kan användas för att bedöma risken för seismicitet för ett brytningssteg, och används tillsammans med spänningsanalys. För närvarande (2004) är inte metoden användbar i vare sig LKABs eller Bolidens gruvor, eftersom man inte har några seismiska databaser. Däremot bör man studera och utvärdera den algoritmen som används för beräkningarna för en eventuell framtida användning.

Cell evaluation method (Beck och Brady, 2002) kan också användas för att bedöma risken för seismicitet i ett föreslaget brytningssteg. Bedömningen görs genom att spänningarna i bergmassan analyseras med 3D-metoder. Resultaten jämförs sedan med seismiska registreringar för att ge ett sannolikhetsbaserat förhållande mellan hållfasthet och inträffade seismiska händelser. Beck (2000) föreslog att två numeriska metoder *MGW* (Modeled Ground Work) och *LERD* (Local Energy Release Density) kunde användas för att bedöma bergmassans belastnings-deformationstillstånd före och efter en seismisk händelse. *MGW* utvecklades av Beck (2000) för australiensiska gruvor, medan *LERD* utvecklades av Wiles (1998) och kalibrerades mot Creighton. Båda dessa metoder kräver kunskap om hur bergmassan reagerar vid en seismisk händelse. För att kunna använda metoderna krävs en seismisk databas, så för närvarande är de inte användbara, men de bör studeras och utvärderas för en eventuell framtida användning. Studier av parametrarna *MGW* och *LERD* och hur de formuleras, kan ge värdefull information om hur en seismiskt aktiv bergmassa kan modelleras.

*SHS* (Seismic Hazard Scale) baseras på en studie av gruvor från hela världen, inklusive tre svenska, nämligen Kristineberg, Malmberget och Kiirunavaara (Hudyma, 2004). Den största fördelen med metoden är att den inte kräver seismiska data för att uppskatta risken för seismicitet för en malmkropp eller en gruva. *SHS* ger också en rimlig uppskattning av storleken på de största händelser som kan inträffa i gruvan (Hudyma, 2004). Nackdelen är att metoden inte kan ge platsen där händelsen ska inträffa, utan bara indikerar om själva malmkroppen är seismisk eller inte. *SHS* är direkt applicerbar på igensättningsbrytning, men bör användas med försiktighet för skivrasgruvorna, eftersom bara sju gruvor med den brytningsmetoden finns med i studien.

För att sammanfatta denna utvärdering, så behöver samtliga metoder (utom *SHS*) kalibreras innan de kan användas. Denna kalibrering är ofta sammankopplad med information från ett seismiskt övervakningssystem, vilket begränsar metodernas användning i Sverige för tillfället. Den seismiska databas som krävs för kalibrering bör vara relativt stor, så att man kan säga vad som är genomsnittsvärden för magnitud, avklingningshastighet. Det kan däremot vara värt att studera de mer okända metoderna i detalj

(*departure indexing method*, *MGW* samt *LERD*), eftersom de utvecklades för förhållanden mer lika de svenska än *ERR* och *ESS*. Ett annat generellt krav är att man måste analysera spänningarna för ett brytningssteg i 3D, för att få så bra indata till metoderna som möjligt. Den seismiska databasen måste kombineras med skadekartering för att ge information om vilken typ av skada och brottmekanism som förknippas med smällberg av en viss magnitud. Skadekarteringen bör också kopplas mot geologiska karteringar och inkluderas i gruvplaneringssystemet, så att man på förhand kan identifiera områden som kan komma att bli seismiskt aktiva.

För Malmberget kan *ESS* och *VESS* vara värda att studera, eftersom glidning längs förkastningar har misstänkts förekomma. En orsak att studera *VESS* är att området är komplext med flera malmkroppar som troligen påverkar varandra. För Kiirunavaara, där det finns ett seismiskt övervakningssystem, kan man testa och utvärdera någon av metoderna *departure indexing method*, *MGW* eller *LERD*.

För igensättningsgruvorna kan *ERR* vara värt att studera, eftersom seismiciteten där verkar vara ett resultat av att den utbrutna volymen ökar.

## 6.7 Sammanfattning av jämförelse

Spänningssambanden för Kristineberg ger spänningar av samma storlek som sambanden för de kanadensiska gruvorna på samma djup. Igensättningsbrytning i Kristineberg är direkt jämförbar med kanadensiska gruvor, så samma typ av seismicitet kan förväntas. Med ökande brytningsdjup bör antalet strain burst öka, vilket också visas i Figur 6.6. EW-malmen har dock ingen fortsättning mot djupet, så om man inte upptäcker en ny malmkropp med liknande egenskaper på större djup, så bör man kunna klara av seismicitetsproblemen med nuvarande förstärkningsmetodik.

Spänningssambanden för Kiirunavaara och Malmberget ger något lägre spänningar än de kanadensiska gruvorna på samma djup. Skivrasbrytning påverkar dock primärspänningstillståndet i ett större område än skivpallbrytning, så huvudspänningarna runt orter i produktionsområdena är troligen ganska lika på samma djup. På grund av det stora ras-



området i Kiirunavaara så är spänningarna troligen högre än i de kanadensiska, vilket också kan vara fallet för några av malmkropparna i Malmberget. Seismicitetens problemen i både Kiirunavaara och Malmberget kan därför förväntas öka med ökande brytningsdjup. Hittills har mest strain burst inträffat, och skadorna har varit relativt begränsade, men med ökande brytningsdjup kan förkastningar runt gruvorna aktiveras. I Malmberget har det redan inträffat händelser som misstänks vara glidning längs förkastningar. Dagens förstärkning är antagligen för styv för att minska konsekvenserna av en strain burst. Systematisk bultning med stora bultbrickor samt fiberarmerad sprutbetong i kritiska områden kan troligen minska skadorna. I skivrasgruvorna bör man testa och utvärdera effekten av avlastning av liggväggsorter på tillredningsnivåerna, med avseende på seismicitet. Brytningssekvenser bör också planeras så att seismiciteten minimeras, vilket innebär att försöka undvika att skapa högt belastade pelare mellan brytningsområdena. I Malmberget bildas naturliga pelare mellan de olika malmkropparna, vilket inte kan undvikas. Dessa pelare kan bli högt belastade när brytningen fortskrider och kan orsaka seismiska händelser i framtiden.

De geologiska förhållandena varierar mellan de studerade gruvorna, men samtliga malmkroppar är belägna i relativt höghållfast och styvt berg. Egenskaperna för de mest seismiskt aktiva bergarterna i de svenska gruvorna överensstämmer väl med seismiskt aktiva bergarter från de utländska gruvorna. I den kanadensiska gruvorna är glidning på förkastningar en vanlig brottmekanism, som för närvarande bara misstänks förekomma i svenska gruvor.

Ett seismiskt övervakningssystem finns redan installerat i Kiirunavaara, och kommer snart att installeras i Malmberget. Tid och resurser bör avsättas för att handha systemet, utvärdera parametrar som kan vara viktiga, och för att kartera skador kopplade till seismiska händelser. Det är också viktigt att förstå hur brytningen påverkar spänningsförhållandena; – tillbakaräkning av brott kan ge värdefull information som kan användas som indata för t.ex. brytningsplanering. Spänningsanalyser i 3D görs inte i de studerade svenska gruvorna, men är vanliga i de kanadensiska. Detta kommer troligen att krävas i framtiden, speciellt i Malmberget, där den storskaliga brytningsmetoden, flera malm-

kroppar utspridda över ett stort område, och förkastningar som korsar gruvan skapar ett tredimensionellt och komplext system. För att förstå vad som händer är första steget att installera ett seismiskt övervakningssystem, men det måste kombineras med kunskap om vilka bergarter som är smällbergsbenägna samt vilka områden som tidigare varit seismiskt aktiva. Ett system för att kartera seismiska skador bör utvecklas och kopplas till den geomekaniska modellen för gruvan. Karteringssystemet skulle också vara ett verktyg för att säkerställa att t.ex. rätt förstärkning används på rätt ställen. Den geomekaniska modellen bör innehålla åtminstone följande parametrar:

- styvhet och hållfasthet för olika bergarter, samt var de finns i gruvan,
- resultat från bergmasseklassificeringar,
- var seismiska händelser inträffat, med noteringar om tidpunkt, typ av skada, beskrivning av skada, aktuell brytningsnivå etc., samt
- brottobservationer, med noteringar om tidpunkt, typ av skada, beskrivning av skada, aktuell brytningsnivå etc.

Resultatet skulle bli en bättre förståelse av hur bergmassan beter sig vid brytning liksom en identifiering av seismiska riskområden. Troligen skulle man också få en minskning av antalet produktionsstopp orsakade av omskrotning och omförstärkning, eftersom rätt förstärkning skulle sättas in direkt, vilket skulle ge en säker arbetsmiljö.

## 7 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Målet med projektet var att klargöra skillnader i beteende mellan svenska och utländska gruvor avseende spänningsförhållanden, brytningsmetoder, brottmekanismer och orttvärsnitt. Utifrån jämförelsen i föregående kapitel kan några slutsatser dras om seismicitet i svenska gruvor

### 7.1 Slutsatser

#### *Spänningstillstånd och brytningsmetoder*

De svenska igensättningsgruvorna är jämförbara med de kanadensiska beträffande spänningstillstånd och brytningsmetoder, vilket innebär att liknande seismicitetsproblem kan förväntas. Kanadensisk metodik beträffande kontroll av seismicitet samt användning av energiabsorberande förstärkning och avlastning bör studeras och utvärderas, för användning i svenska gruvor.

De svenska skivrasgruvorna är inte direkt jämförbara med de studerade skivpallgruvorna. Skivrasbrytning påverkar primärspänningstillståndet över ett större område än skivpallbrytning, vilket innebär att primärspänningarna runt liggväggsorterna är lika höga eller högre på samma djup i skivrasgruvorna.

#### *Hålrums tvärsnitt*

Enskilda orters tvärsnitt verkar inte påverka förekomsten av seismicitet i stor skala, men att ändra tvärsnitt från ett krökt tak till ett plant tak reducerade förekomsten av spjälkning (Craig).

#### *Brottmekanismer*

De svenska gruvorna bör förvänta sig en ökad daglig seismisk aktivitet och större händelser med ökande brytningsdjup. Den vanligaste typen av händelse är strain burst, vilken inträffar både i igensättnings- och skivrasgruvorna. I igensättningsgruvorna förekommer strain burst i samband med ortdrivning och brytning av mellanskivor. Dessa händelser orsakar oftast begränsade skador. I skivrasgruvorna förekommer strain burst

främst i liggväggsorterna, och dessa händelser kan ibland orsaka nedfall på flera ton. Fault slip förekommer inte ofta i de svenska gruvorna. Några händelser som misstänks vara fault slip inträffade i Malmberget under förra året (2004). Ingen tydlig gräns för övergång från strain burst till fault slip har kunnat identifieras.

## **7.2 Rekommendationer**

### ***Förslag för fortsatt arbete***

Hittills har skadorna orsakade av seismicitet varit ganska begränsade och har kunnat kontrolleras med den styva förstärkning som är standard. När händelserna ökar i styrka kan det ge mer omfattande skador, och då måste förstärkningen kompletteras med komponenter som kan ta upp energi och deformationer. Ett exempel är att använda systematisk bultning med kamjärns- och friktionsbultar med stora brickor i kombination med fiberarmerad sprutbetong i kritiska områden, vilket kan bidra till att reducera skadornas omfattning. I skivrasgruvorna bör olika typer av avlastning testas och utvärderas i liggväggsorterna för att se hur seismiciteten påverkas.

Användning av rätt förstärkning kräver att seismiska områden kan identifieras innan seismicitet börjar uppträda. Denna identifiering kan göras genom att kombinera en geomekanisk modell med spännings- och energimodellering i 3D av ett planerat brytningssteg. Några av de studerade gruvorna har redan en geomekanisk modell som kan vidareutvecklas till att korrelera geologi med seismiska händelser och med spänningsanalys i liten och stor skala. I liten skala kan områden som har höga spänningar misstänkas vara smållbergsbenägna om bergarten är spröd och har hög hållfasthet. I stor skala bör spänningssituationen kring geologiska strukturer studeras för att bedöma om glidning är trolig eller inte.

### ***Förslag för framtida forskning***

De olika metoder som utvecklats för att förutsäga seismicitet bör studeras och utvärderas. Några av metoderna är användbara idag för alla gruvor, medan andra kräver en databas med information som bara kan fås från ett seismiskt övervakningssystem. Samtliga metoder kan ge värdefull information om bergmassans tillstånd, och kan användas

för att bestämma seismiska riskområden. För Malmberget kan *ESS* och *VESS* vara värda att studera, eftersom man misstänker att glidning längs strukturer förekommer. För Kii-runavaara, där ett seismiskt övervakningssystem finns, kan någon av metoderna *departure indexing method*, *MGW*, eller *LERD*, studeras och utvärderas. För igensättningsgruvorna kan *ERR* vara värt att studera, eftersom seismiciteten verkar vara en funktion av utbruten volym.

Ett seismiskt övervakningssystem är en investering som bör övervägas i de gruvor som är seismiskt aktiva, både för lokalisering och för magnitudbestämning av seismiska händelser, men också för att övervaka bergmassans beteende under brytning.



## 8 ERKÄNNANDEN

Denna rapport utgör den avslutande delen av ett forskningsprojekt vars syfte var att öka kunskapen om brytningsinducerad seismicitet i Sverige. Finansiellt stöd för projektet gavs av New Boliden, LKAB och SveBeFo. Ett stort tack till referensgruppen som utgjordes av Christer Andersson, SKB, Tomas Franzén, SveBeFo, Lars Malmgren, LKAB, Per-Ivar Marklund, New Boliden, Professor Arne Myrvang, NTNU, Professor Erling Nordlund, Avdelningen för Bergmekanik samt. Jonny Sjöberg, SwedPower AB.

Arbetet som presenterats i denna rapport är ett resultat av litteraturstudier, fältstudier i tre svenska gruvor samt flera utländska gruvor. Jag vill rikta ett tack till personalen i Bolidens och LKABs gruvor som hjälpt mig vid mina besök. Jag vill också tacka Anneta Sampson-Forsythe och Brad Simser (Falconbridge Ltd. Sudbury), Dan Cooper, Farid Malek, and Allan Punkkinen (INCO, Sudbury), Katja Sahala och Timo Mäki (Inmet, Pyhäsalmi) samt Bengt Sand (Rana Gruber AS, Ørtfjell) för att de är utmärkta guider och för att de tålmodigt ställt upp med svar på frågor och information.





## 9 REFERENSER

Alcott, J. M., Kaiser, P. K., Simser, B. P., 1998, Use of Microseismic Source Parameters for Rockburst Hazard Assessment. *Pure and Applied Geophysics*, vol 153, pp 41-65

Amadei, B., Stephansson, O., 1997, *Rock Stress and Its Measurement*. London: Chapman and Hall

Andersen, L., 2001, *A relative moment tensor inversion technique applied to seismicity induced by mining*. Doktorsavhandling, University of Witwatersrand, Johannesburg, Sydafrika

Askemur, T., 2004, Personlig kommunikation, Zinkgruvan Mining

van Aswegen, G., Mendecki, A. J., Funk, C., 1997, Kapitel 11 i *Seismic Monitoring in Mines*, Mendecki (ed.), London: Chapman & Hall

Beck, D., 2000, *A method for Engineering Management of Induced Seismicity in Deep-Level Hard Rock Mining*. Doktorsavhandling, University of Queensland, Australien (opublicerad)

Beck, D. A., Brady, B. G. H., 2002, Evaluation and application of controlling parameters for seismic events in hard-rock mines. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol 39, pp 633-642

Borg, T., 1988, *Ortdrivning med avlastningsprängning; Bergmekanisk uppföljning på 815 m nivå i Malmberget*. BeFo-rapprt 331:1/88, SveDeFo 1989:1

Brummer, R. K., Blake, W., 1998, *Destress Blasting Practices (A Review of Literature & Current Industrial Practice)* Rapport kontrakterad av CAMIRO Mining Division, Sudbury, Ontario, Kanada

Cook, N. G. W., 1976, Seismicity induced by mining. *Engineering Geology*, vol 10, pp. 99-122

- Curran, J. H., Corkum, B. T., 1996, *Examine 2D – 2D boundary element program for calculating stresses around underground excavations in rock. User's guide. Version 6.0*, Rock Engineering Group, University of Toronto, Kanada
- Engberg, H., 1989, *Avlastningsprängningar i Laisvallgruvan – En fältstudie*. Examensarbete 1989:189 E, Högskolan i Luleå, Luleå
- Gibowicz, S. J., Kijko, A., 1994, *An Introduction to Mining Seismology*. San Diego: Academic Press, ISBN: 0-12-282120-3
- Hanks, T. C., Kanamori, H., 1979, A Moment Magnitude Scale. *J. Geophys. Res.*, vol 84, pp 2348-2350
- Hedley, D. G. F., 1992, *Rockburst Handbook for Ontario Hardrock Mines*. CANMET Special Report SP92-1E, Ottawa: Canada Communication Group
- Herget, G., 1988, *Stresses in Rock*. Rotterdam: A.A. Balkema
- Hoek, E., Brown, E. T., 1982, *Underground Excavations in Rock 2<sup>nd</sup> ed*. Institution of Mining and Metallurgy, London: E and FN Spon, ISBN: 0-419-16030-2
- Hudyma, M. R., 2004, *Mining-Induced Seismicity in Underground, Mechanised, Hardrock Mines – Results of a World Wide Survey*. Australian Center for Geomechanics, University of Western Australia
- Jaeger, J.C., Cook, N. G. W., 1979, *Fundamentals of Rock Mechanics 3<sup>rd</sup> ed*. London: Chapman and Hall, ISBN: 0-412-22010-5
- Jeremic, M. L., 1987, *Ground mechanics in hard rock mining*. Rotterdam: A.A. Balkema, ISBN: 90-6191-587-2
- Kaiser, P. K., McCreath, D. R., Tannant, D. D., 1995, *Rockburst Support*, Volume 2 of Canadian Rockburst Research Program 1990-1995, vols 1 – 6, CAMIRO Mining Division, Sudbury, Ontario, Kanada

- Krauland, N., Söder, P.E., 1988, Bergstabilisering genom avlastningssprängning – erfarenheter från Bolidens gruvor. *Bergmekanikdag 1988*, BeFo
- Larsson, K., 2004a, Seismicity in Mines – A Review. Teknisk rapport, 2004:22 Luleå tekniska universitet
- Larsson, K., 2004b, Mining Induced Seismicity in Sweden. Licentiatavhandling, 2004:80 Luleå tekniska universitet
- Marklund, P.-I., 2004, Personlig kommunikation, Boliden Mineral AB
- Martin, C. D., Christiansson, R., Söderhäll, J., 2001, *Rock stability considerations for siting and constructing a KBS-3 repository. Based on experiences from Äspö HRL, AECL's URL, tunneling and mining*. SKB Technical Report TR-01-38, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm, Sverige
- Mendecki, A. J., van Aswegen, G., Mountfort, P., 1999, A guide to routine seismic monitoring in mines, i *A Handbook on Rock Engineering Practice for Tabular Hard Rock Mines*. Jager and Ryder (eds.) SiMRAC, Kapstaden, Sydafrika: Creda Communications,
- Müller, B., Zoback, M. L., Fuchs, K., Mastin, L., Gregersen, S., Pavoni, N., Stephansson, O., Ljunggren, C., 1992, Regional patterns of tectonic stress in Europe. *J. Geophys. Res.*, vol 97, 11783-803
- Ortlepp, W. D., Stacey, T. R., 1994, Rockburst Mechanisms in Tunnels and Shafts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol 9:1, pp 59-65
- Ortlepp, W. D., 1997, *Rock Fracture and Rockbursts, an illustrative study*. Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy
- Poplawski, R. F., 1997a, *Seismicity underground with particular reference to seismic problems at Mt Charlotte Mine*, Doktorsavhandling, University of Melbourne, Australien

Poplawski, R. F., 1997b, Seismic parameters and rockburst hazard at Mt Charlotte Mine, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol 34:8, pp 1213-1228

Potvin, Y., Hudyma, M. R., 2001, Keynote address: Seismic monitoring in highly mechanized hardrock mines in Canada and Australia. *Proc. 5<sup>th</sup> Int Symp Rockbursts and Seismicity in Mines / Johannesburg/ 17-20 September 2001*, van Aswegen, Durrheim och Ortlepp (eds.), Johannesburg: South African Institute of Mining and Metallurgy, pp 267-280

Ryder, J. A., 1988, Excess shear stress in the assessment of geologically hazardous situations. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol 88:1, pp 27-39

Salamon, M. D. G., 1983, Rockburst hazard and the fight for its alleviation in South African gold mines. *Proc. Symp. Rockbursts: prediction and control / London / 20 October 1983*, London: Institution of Mining and Metallurgy, pp 11-36

Sandström, D., 2003, *Analysis of the Virgin State of Stress at Kiirunavaara Mine*. Licentiatavhandling 2003:02, Luleå tekniska universitet

Shearer, P. M., 1999, *Introduction to Seismology*. Cambridge: Cambridge University Press ISBN: 0-521-66023-8

Sjöberg, J., Lundman, P., Nordlund, E., 2001, *Analys och prognos av utfall i bergschakt, KUJ 1045 Slutrapport*, LKAB internrapport nr 01-762

Spottiswoode, S. M., 1990, Volume excess shear stress and cumulative seismic moments. *Proc. 2<sup>nd</sup> Int Symp Rockbursts and Seismicity in Mines / Minneapolis/ 8-10 June 1988*, Fairhurst (ed.), Rotterdam: A.A. Balkema, pp 39-43

Stephansson, O., 1993, Rock Stress in the Fennoscandian Shield. Kapitel 17 i *Comprehensive Rock Engineering*, Hudson (ed.), Oxford: Pergamon Press, vol 3, pp 445-459

Toper, A. Z., Grodner, M., Stewart, R. D., Lightfoot, N., 1997, Preconditioning: A rockburst control technique. *Proc. 4<sup>th</sup> Int Symp Rockbursts and Seismicity in Mines / Kraków / 11-14 August 1997*, Gibowicz och Lasocki (eds.), Rotterdam: A.A. Balkema, pp 267-272

Vervoort, A., Moyson, D., 1997, Steel fibre reinforced shotcrete: An adequate support for rockburst conditions? *Proc. 4<sup>th</sup> Int Symp Rockbursts and Seismicity in Mines / Kraków / 11-14 August 1997*, Gibowicz och Lasocki (eds.), Rotterdam: A.A. Balkema, pp 355-359

Wawersik, W. R., Fairhurst, C., 1970, A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, vol 7, pp 561-575

Wiles, T. D., 1998, *Correlation Between Local Energy Release Density and Observed Bursting Conditions at Creighton Mine*. Rapport kontrakterad för INCO Ltd. Mines Research, Sudbury, Kanada

<http://www.twpinc.com/wiremeshgauge.html> [access November 28, 2004]

<http://www.screentg.com/gaugewire.htm> [access November 28, 2004]