

**Spänningsmätningar i Skandinavisk
berggrund – förutsättningar, resul-
tat och tolkning**

Sten G A Bergman

Stockholm november 1977

SPÄNNINGSMÄTNINGAR I SKANDINAVISK BERGGRUND -
FÖRUTSÄTTNINGAR, RESULTAT OCH TOLKNING

Sten G A Bergman
Stockholm november 1977

Denna rapport utgör redovisning av ett arbete som utförts på uppdrag av KBS. Slutsatser och värderingar i rapporten är författarens och behöver inte nödvändigtvis sammanfalla med uppdragsgivarens.

I slutet av rapporten har bifogats en förteckning över av KBS hittills publicerade tekniska rapporter i denna serie.

SPÄNNINGSMÄTNINGAR I SKANDINAVISK BERGGRUND - FÖRUTSÄTT-
NINGAR, RESULTAT OCH TOLKNING

Stress measurements in Scandinavian bedrock - conditions
precedent, results and evaluation.

Sten G. A. Bergman

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	sid
Summary	1
1. Bergmassors struktur. Lokala spännings- variationer	2
2. Spänningsmätningars tekniska utförande	4
3. Mätresultat	7
4. Tolkning av mätresultaten	9
5. Slutsatser	16
Figurer	18
Referenser	24

SUMMARY

In situ stress measurements in Scandinavian bedrock are reviewed and discussed. The conditions precedent in order to obtain reasonably reliable three - dimensional stresses in the rock mass space mosaic structure are analyzed. It is concluded that measurements with the LEEMAN three - dimensional or door - stopper method and with the modified LEEMAN - HILTSCHER method give good results due to the fact that the deformations are measured within a very small volume (less than a few hundreds of cm^3). The effects from usually fairly high perturbation block - bound stresses can be equalized by using the average value for more than 8 - 10 measuring "points" along a borehole. Experience shows that such average values have a fair consistence.

The method used by HAST combines one-dimensional measurements from various points. The block-bound perturbation stresses are not equalized. It is therefore probable that this method tends to overestimate the stresses. This conclusion is supported by field tests comparing the HAST method with the afore-mentioned methods and also by the fact that, as shown in Fig.4, the HAST in situ stresses generally are higher than those measured by other methods.

Generally, however, it can be stated that the stress measurements indicate higher horizontal compression stresses and shear stresses than should be expected from elastic theory. Most of the stress values obtained with the measuring methods judged to be reliable can be interpreted as residual stresses caused by creep phenomena in the rock mass during late glaciations.

It is concluded that it will probably be fairly easy to find Swedish bedrock, where qualified rock tunnels (chambers) with moderate span can be cut out at 100-1000 m depth without any manifest stability problems, excavation difficulties or heavy reinforcements to be anticipated from rock stress conditions.

1. BERGMASSENS STRUKTUR. LOKALA SPÄNNINGSVARIATIONER

Vi vet genom erfarenheter från gruvor, bergrum och kärnbronningar att de skandinaviska urbergarterna ned till stora djup - mer än 1000 m - är kraftigt uppspruckna med sprickavstånd och sprickvidder, som kan variera inom vida intervall. I princip är sådana bergmassor mycket väl hopfogade rymdmosaikstrukturer uppbyggda av diskreta block av olika form och storlek (BERGMAN 1965 a). Kraftöverföringen mellan olika block bestäms i stor utsträckning av fogarnas egenskaper, där variationen kan vara stor från skrovliga ytor i ingrepp till plana och glatta ytor med friktionsnedsättande fyllnad (BARTON et al 1974).

Under inverkan av yttre krafter som gravitation, tektonik o dyl samt eventuella inre kvarstående krypspänningar från tidigare, ej längre verkande belastningar, t ex glaciala eller tektoniska, pressas och skjivas de olika mosaikblocken mot varandra. De oregelbundna kontaktytorna mellan blocken, där ibland endast delar av fogarna deltar i kraftöverföringen, medför att det över den regionala medelspänningen inne i blocken kommer att finnas överlagrade lokala spänningsfält.

Detta fenomen illustreras i fig. 1, som hämtats från spänningsoptiska försök med planmosaik (LANG 1959; BERGMAN 1965 b). Trots att sprickorna i dessa försök var plana med låg friktion framträder effekten av de lokala blockspänningarna tydligt. Fig.2 är ett starkt schematiserat tvådimensionellt exempel, som visar vilka stora spänningsvariationer som uppträder i ett kvadratisk "block" redan vid något ojämnt fördelade randtryckbelastningar. Tillföres skjuvkrafter och punktlaster, vilket torde vara regel i verkligheten, kan variationerna bli ännu större.

Man kan förutse, att de lokala blockspänningarna skall spela en relativt sett mindre roll, när den regionala tryckspänningen blir stor, t ex på stora djup. Inom området ner till 1000 m djup kan man dock förutsätta, att de lokala spänningsvariationerna ej kan negligeras, vilket också bestyrks av erfarenheten (LI 1970 b; MYRVANG 1976).

På stora djup - mer än 100 à 150 m - har man hittills vid noggrann mätning av in situ-spänningar varit hänvisad till att utföra dessa från utsprängda orter eller tunnlar, oftast i gruvor. Härvid måste mätpunkterna placeras så, att de av tunneln orsakade spänningskoncentrationerna i bergmassan undvikas. På basis av elasticitetsteoretiska överväganden anses detta i regel vara fallet om mätpunkterna förläggs så långt utanför tunnelperiferien som 2 à 3 gånger tunnelseparvidden. Heterogeniteter i bergmassan - körtlar, malmgränser etc - kan emellertid innebära sådana lokala spänningsomfördelningar, att dessa avstånd inte garanterar avsedd eliminering av tunnelns störningszon (GOODMAN 1966).

De beskrivna egenskaperna hos bergmassan och dess komponenter utgör en del av de grundläggande förutsättningarna för spänningsmätning - egentligen deformationsmätning - i berg under fältförhållanden. De innebär bl.a.

dels att en två- eller tredimensionell deformationsmätning (spänningsmätning) måste ske inom ett mycket begränsat område (några hundratal cm^3) för att kunna ge ett tillförlitligt besked om lokala huvudspänningars storlek och riktning (HILTSCHER 1970, 1972; HILTSCHER et al 1970; DENKHAUS 1966; LI 1970 a).

dels att man vid spänningsmätningar måste räkna med stor spridning i resultaten från mätpunkt till mätpunkt (HILTSCHER 1970, 1974 a, b; MYRVANG 1976; CARLSSON 1977)

dels ock att man för att få ett någorlunda tillförlitligt underlag för bestämning av det regionala spänningstillståndet måste mäta i ett relativt stort antal ganska närbelägna punkter inom aktuellt mätområde (aktuellt borrhål) (LI i diskussion till STEPHANSSON 1974; HILTSCHER 1974 a; MYRVANG 1976; CARLSSON 1977).

2. SPÄNNINGSMÄTNINGARS TEKNISKA UTFÖRANDE

Praktiskt taget samtliga spänningsmätningar, som företagits i skandinaviska bergmassor och redovisats i litteraturen, har utförts med någon av följande tre metoder:

Hasts magnetostriktiva mätcell (HAST 1965, 1974).

Leemans tredimensionella metod - NTH version

(LI 1970 b, MYRVANG 1970, 1976).

Leeman - Hiltschers hålbotten - friborrningsmetod med kompletterande längsstöjningsmätning (HILTSCHER 1974, 1975).

Den tredje metoden är en variant av Leemans "doorstoppermetod", vilken i sin originalversion i viss utsträckning har använts av NTH (MYRVANG 1970) och före 1971 av Hiltscher (HILTSCHER et al 1970).

Samtliga metoder bygger på principen att först borra ett hål in till den aktuella mätplatsen, därefter införa något mätton i borrhålet, och slutligen friborra en del av borrhålets omgivning inklusive mätton med en koncentriskt till det första hålet ansatt diamantkrona. Vid friborringen avlastas de aktuella bergspänningarna, och mättonen registrerar de deformationer, som därvid uppträder i den friborrade "mätkroppen". Sedan mätkroppens elastiska konstanter E (elasticitetsmodul) och ν (Poissons tal) bestämts, kan det mot deformationen svarande spänningstillståndet beräknas.

Med Hasts mätcell kan man i en viss punkt endast mäta deformationen i en riktning vinkelrätt borrhålsaxeln för varje friborring. Registrering i två riktningar kan ske i samma borrhål men på ett visst avstånd - någon decimeter - från varandra. Registrering i riktning parallell med borrhålet förutsätter ett nytt borrhål vinkelrätt mot det första. Teoretiskt kan tre "endimensionella" mätningar utföras inom ett område av något 10-tals dm^3 volym, men i praktiken är en invändningsfri sådan mätning knappast genomförbar under fältförhållanden. De resultat, som i litteraturen redovisats med Hasts mätmetod, synes oftast ha utförts med de tre "endimensionella" mätningarna förlagda till punkter på avsevärda avstånd från varandra enligt fig.3. (HAST 1965, 1974; MATIKAINEN 1970).

Hast har hävdats att man med hans mätcell mäter "spänningen" direkt, som om mätpunkten enbart "tänkts placerad i sitt läge i berget" (HAST 1965). Han motiverar sitt anspråk med att mätcellen dels förspännes mot borrhålsväggarna, dels i förväg kalibreras i hål med kända spänningstillstånd. Anspråket är dock rent formellt; i verkligheten mätes deformationsändringen vid friborrning (HILTSCHER 1974 b, DENKHAUS 1966).

Med Leemans tredimensionella metod, vilken i huvudsak använts av NTH, mäts man med tre trådtöjningsgivarrosetter deformationsändringarna på den cylindriska väggen av ett borrhål vid friborrning. Rosetterna placeras inom en volym av ca 50 cm^3 , varför man - om inte spänningsgradienten över hålet är mycket stor - kan tala om en bestämning av spänningarna i en punkt ur praktisk synpunkt. Med en friborrning erhålles en (ur kontrollsynpunkt värdefull) överbestämning av deformationskomponenterna, vilket möjliggör beräkning av huvudspänningarnas storlek och riktning (HILTSCHER 1974 a, b).

Leeman-Hiltschermetoden fordrar 2 friborrningar för en tredimensionell spänningsregistrering. Dels mätes med trådtöjningsgivare på planad borrhålsbotten, dels mätes på samma sätt i axiell led på borrhålsväggen. Detta medför att den för deformationsregistrering erforderliga bergvolymen blir av storleksordningen 500 cm^3 . Beräkningen av spänningarna blir något approximativ och hänför sig egentligen till två punkter på 8-10 cm avstånd från varandra. Ur praktisk synpunkt synes man kunna anse att huvudspänningstillståndet registreras i en punkt (HILTSCHER 1974 a, b).

De tre mätmetoderna har jämförts med varandra i mycket omfattande och grundliga fältförsök i Malmberget (HILTSCHER 1974 a, b). Redovisningen av resultaten omfattar också en grundlig beskrivning och analys av de olika metodernas praktiska och teoretiska förutsättningar samt deras styrka respektive svaghet.

Mätningarna med de tre metoderna utfördes i närliggande parallella horisontella hål, och axiella längsspänningar kunde ej registreras med Hasts metod. En resultatanalys synes ge vid handen att Hasts metod redovisar högre spänningar än de övriga. Lägst spänningar registrerar Leemans metod. Av förklaringarna till detta förhållande synes Li's anmärkning att en korrekt uppfattning om längsspänningen

är avgörande för såväl Hasts som Leeman-Hiltschers metod, vara grundläggande (LI i diskussionsinlägg till HILTSCHER 1974 a). Möjligheten till korrekt bedömning av längsspänningen minskar med avståndet mellan mätpunkterna.

En sammanfattande bedömning av de tre mätmedoderna är följande:

- Hasts metod måste för tredimensionell spänningsbestämning kombinera endimensionella deformationsmätningar från punkter på relativt stora avstånd, fig.3. Detta ger betydande osäkerhet med tendens till för stora spänningsvärden.
- framför allt Leemanmetoden men även Leeman-Hiltschermetoden mäter deformationsändringar inom så små volymer, att de ur praktisk synpunkt endast i undantagsfall bör kunna påtagligt störas av förekommande lokala spänningsgradienter.

3. MÄTRESULTAT

Mätningar för att försöka utröna berggrundens spänningstillstånd in situ har utförts i Skandinavien sedan 1951. De första mätresultaten redovisades av HAST 1958 och avsåg mätningar i olika gruvor. Samma resultat med ytterligare kompletteringar har även publicerats senare (HAST 1965, 1974). Alla mätningar har utförts med den tidigare omnämnda Hasts mätcell, som också använts av MATIKAINEN 1970.

LI (1970 a, b) och MYRVANG (1970, 1976, 1977) redovisar ett ganska stort antal mätningar från norska och svenska gruvor och anläggningar. Dessa mätningar har i huvudsak utförts med Leemans tredimensionella metod (i några fall med door-stoppermetoden). Med väl utvecklade kontrollmetoder erhålles numera med minst 8-10 individuella mätningar i varje borrhål, se fig.3, praktiskt taget alltid väl tolkbara mätresultat (MYRVANG 1976). De tre huvudtöjningarna kan variera starkt från punkt till punkt - på grund av lokala blockspänningar - men medelvärdena visar nästan alltid god samstämmighet.

På fig.4 har de omnämnda mätresultaten införts i ett diagram, som visar summan av de horisontella huvudspänningarna $(\sigma_1 + \sigma_2)_H$ som funktion av djupet under markytan. Detta representationssätt introducerades av HAST 1958 och har sedan blivit allmänt använt. Det bör emellertid noteras, att de verkliga tredimensionella huvudspänningarna på större djup inte behöver vara horisontella-vertikala, även om en tillnärmelsevis sådan orientering tycks vara ganska vanlig.

På fig.4 har även inlagts vissa mätvärden erhållna av HILTSCHER 1972 med Leeman-Hiltschers mätmetod. Likaså redovisas en mätning från KBS försöksstation Stripa med Leemans tredimensionella metod dels som medelvärde från 13 mätpunkter i ett borrhål, dels som malkombination av värden från olika punkter i samma borrhål (CARLSSON 1977).

Fig.4 illustrerar med stor tydlighet att de av Hast redovisade spänningarna nästan genomgående ligger över övriga mätvärden. Differensen synes accentueras med ökande djup. Huvuddelen av mätresultat

från LI, MYRVANG, HILTJØCHER och CARLSSON ligger samlade inom det streckade området. Detta innesluter även en stor del av HASTs mätvärden ned till 200 m djup men med klar koncentration till områdets övre gräns.

4. TOLKNING AV MÄTRESULTATEN

Det är som framgår av fig.4 en ganska förvirrad bild som möter, när man sammanställer de bergspänningsmätningar som företagits i Skandinavien. Hur skall man då tolka mätresultaten? Vad kan man dra för slutsatser?

HAST (1958), som redovisade de första mätresultaten, tolkade dessa så att bergmassans horisontalspänning $(\sigma_1 + \sigma_2)_H$ ökade linjärt med djupet under markytan efter den heldragna linje, som finns i fig.4. Horisontalspänningarna ansågs orsakas av tektoniska krafter. Spänningarnas avtagande mot markytan skulle bero på att horisontella tvärtöjningssprickor och därmed följande uppåtriktad deformation medförde avlastning av ytpartierna. Tvärtöjningssprickorna kunde då också förklara s k bankningssprickor, som är vanliga i berggrunden. I konsekvens härmed antog HAST att de horisontella bergspänningarna på alla nivåer motsvarade ett slags brottspänningstillstånd (HAST 1965). Senare har HAST - med olympiskt bortseende från andra forskares mätresultat och i viss mån även egna - fasthållit och byggt ut denna tolkning (HAST 1974) med påståendet att den maximala horisontella skjuvspänningen $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)_H$ skulle vara konstant med djupet och ungefär 12 MPa, vilket skulle svara mot en genomsnittlig konstant skjuvhållfasthet hos berget.

Antagandet om konstant skjuvhållfasthet hos bergmassan in situ oberoende av djupet är felaktigt. Det finns en mycket gedigen experimentell bevisning för att skjuvhållfastheten ökar nära linjärt med djupet, dvs med trycket från ovanliggande bergmassa (PUSCH 1977). Av fig.5, som visar uppmätta horisontella max-skjuvspänningar som funktion av djupet, framgår att inte ens HASTs egna mätningar (HAST 1974) ger grund för påståendet om skjuvspänningens konstans vid ca 12 MPa.

Vad kan nu vara förklaringen till att HASTs mätvärden genomgående ligger så mycket högre på fig.4 än övriga forskares värden?

En orsak är redan berörd och dokumenterad i avsnitt 1 och 2, nämligen att man med HASTs metod inte kan mäta alla deformationskom-

ponenter i en punkt. Vid tidiga mätningar, vilka omfattat nästan alla resultat från stora djup, synes olika komponenter ha mätts på stora avstånd från varandra, i princip enligt lägena A i fig.3 (HAST 1965). Upplysande är en uppgift från HANSAGI (MATIKAINEN 1970) om bergspänningsmätningar i Kiruna med HASTs metod: "endast 9 av 27 mätpunkter gav sådant resultat - dock ej entydigt - att de kunde redovisas". Det ligger i sakens natur att de deformations- eller spänningskomponenter, som i sådana fall kombineras till huvudspänningar, kan innehålla starka störningar från blockbundna överspänningar. Det är också rimligt att höga spänningsvärden löper mindre risk att utgallras än låga.

I fig.4 finns ett illustrerande exempel på vad detta kan innebära kvantitativt. Medelvärde erhållet med Leemans tredimensionella metod från 13 mätpunkter i ett 20 m långt borrhål i Stripagruvan på 340 m djup (CARLSSON 1977) har redovisats med värdet $(\sigma_1 + \sigma_2)_H = 28,2$ MPa. En kombination av σ_{1H} resp σ_{2H} från två godtyckliga punkter på 1,8 m avstånd ger 46,9 MPa, och värden från en punkt med maximalkombination ger 43,5 MPa! Dessa kombinationer med icke utjämnade blockbundna överspänningar ansluter väl till HASTs räta linje.

En annan möjlig orsak kan i vissa fall vara, att mätningarna utförts så nära brytningsrum, att de registrerade spänningarna också kommit att inkludera vissa av brytningsrummen framkallade sekundärspänningar. I en tidig publikation (HAST 1965) anges att mätthålets djup göres "stort - i regel mer än 5 m", varvid ortens störande inverkan anses kunna försummas. Detta är sant vid elastiskt och isotropt material och ortdiameter $< ca 3,5$ m (PUSCH 1974) men kan vara helt otillräckligt vid anisotropa och plasticerande bergmassor och/eller större ortbredd (GOODMAN 1966). Möjligheten att mäta tre inom en liten volym väl samlade deformationskomponenter med HASTs (eller liknande mätmetoder) synes endast föreligga då man kan operera från skilda brytningsrum, i vilket fall risken för att inkludera sekundärspänningar bör vara extra stor. Det enda någorlunda invändningsfria mätfallet blir när två vinkelräta deformationskomponenter mäts nära varandra i samma borrhål och spänningen i borrhålets längsriktning är försumbar (HILTSCHER 1974 b). Bortsett från

mätningar nära ett brytningsrums konturyta, dvs klart inom sekundärspänningsfältet, kan detta bedömas förekomma endast i specialfall (t ex HILTSCHER 1972).

En tredje bidragande orsak till HASTs höga spänningsvärden kan vara att många mätningar utförts i gruvor, där malmkropparna haft andra elastiska och plastiska egenskaper än sidoberget. Det är visat både teoretiskt (GOODMAN 1966) och vid fältmätningar (HERGET 1971) att i sådana fall den "styvare" bergmassan tar upp högre spänningar än den mjukare (ofta malmen).

Det är intressant att konstatera att mätningar i en kanadensisk järngruva på nivå 350-600 m med principiellt samma mätmetodik som HAST givit med denne samstämmiga resultat (HERGET 1971).

De här anförda argumenten synes ge underlag för slutsatsen att de av HAST redovisade horisontalspänningarna, fig.4, avsevärt överdriver de verkliga regionala medelspänningarna på respektive mätplatser.

De flesta mätvärden, som redovisats av MYRVANG, LI, HILTSCHER och CARLSSON liksom många av HAST på djup < 200 m, faller inom det streckade området i fig.4. Detta begränsas på ena sidan av den räta linjen för elastiskt, isotropt fall

$$(\sigma_1 + \sigma_2)_H = 2 \cdot \sigma_H = \frac{2\nu}{1-\nu} \cdot \sigma_V = 2K_0 \sigma_V \quad (1)$$

där

ν = Poissons tal

$\sigma_V = \gamma H$

γ = bergmassans medeltunghet

H = djup under markytan.

I fig.4 har valts $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ och $\nu = 1/6$, vilket ger $K_0 = 0,2$.

Den övre gränsen för det streckade området har lagts vid

$$(\sigma_1 + \sigma_2)_H = \text{konstant} = 32 \text{ MPa.}$$

Det har påpekats av olika geologer (bl a MÖRNER 1977), att den skandinaviska berggrunden har ett mycket gammalt tektono-geodynamiskt arv, varför eventuella in situ-spänningar kan ha ett gammalt och komplext ursprung. Som redan nämnts har HAST antagit att de av honom redovisade regionala höga horisontalspänningarna har huvudsakligen tektoniska orsaker.

Det är naturligtvis odiskutabelt, att en så gammal struktur som den skandinaviska berggrunden, som enligt geologernas undersökningar har skjuvats, bjujts och krossats sönder i både regional och lokal skala, och som både i bergartsmaterial och fogstrukturer rymmer stora möjligheter till plastiska deformationer, ofta kan bära med sig ärvda spänningar och kraftfält. Spänningarna kan vara blockbundna residualspänningar (vilka komplicerar tolkningen av alla spänningsmätningar) (VOIGHT 1966 a, STEPHANSSON 1974). De kan också vara "tektoniskt aktiva residualspänningar" (krypsspänningar), som motsvaras av ett större eller mindre regionalt kraftfält (VOIGHT 1966 c, DENKHAUS 1966).

Eftersom vi har mycket diffusa kunskaper om de belastningar, som berggrunden utsatts för under flera hundra miljoner år, och dessutom varje ny belastningscykel av betydande styrka och varaktighet till stor del "raderar ut" inverkan av tidigare cykler, är historisk detaljanalys ej möjlig. Det enda man kan räkna med är approximativa uppskattningar av residualverkan från sena belastningsändringar, t ex erosion, glaciation o dyl.

Den senaste nedisningen av Skandinavien hade sitt maximum för ca 20 000 år sedan och istäcket anses ha varit minst 3 km tjockt (MÖRNER 1977).

Det kan i och för tolkningen av de på fig.4 redovisade bergspänningsmätningarna vara av intresse att beräkna vilka kvarstående horisontella spänningar krypdeformationen under ett sådant istäckes tyngd kan ge upphov till efter avsmältning. En av VOIGHT (1966 b) framlagd beräkningsmodell kan användas härför.

Grovt schematiskt kan vi uppdelat skeendet i tre tänkta stadier:

1. Elastiska deformationer under istid
2. Krypdeformationer (plastiska) under istid
3. Tillstånd efter isens avsmältning.

Dessa olika stadier har schematiskt illustrerats i fig.6 med konsekvenser beträffande vertikal- och horisontalspänningar i en godtycklig punkt på djupet H under bergytan. Det elastiska stadiet 1 tjänar närmast till att definiera den elastiska relationen K_0 mellan horisontal- och vertikalspänning. Med val av Poissons tal

$$\nu = 1/6 \text{ erhålles } K_0 = 0,2.$$

Under istäckets långtidsbelastning inträffar i bergmassan även plastiska deformationer (krypdeformationer), som medför spänningsomlagringar, stadium 2 i fig.6. Relationen mellan horisontal- och vertikalspänning blir K_k med ett värde liggande mellan det elastiska $K_0 (=0,2)$ och det "hydrostatiska" gränsvärdet 1, dvs

$$0,2 < K_k < 1 \quad (2)$$

Värdet på K_k kan variera beroende på bergmassans krypegenskaper och även med belastningens varaktighet.

Vid istäckets avsmältning, stadium 3 i fig.6, minskar den genomsnittliga vertikalspänningen med ett värde motsvarande istäckets tyngd. Horisontalspänningen kan däremot inte avlastas på samma sätt, eftersom krypdeformationen inte till någon väsentlig del är reversibel (WAWERSIK 1974). Man kan då uppskatta det resulterande relationstalet K mellan horisontal- och vertikalspänning till, se fig.6,

$$K = K_k + \frac{\gamma_1 H_1 (K_k - K_0)}{\gamma H} \quad (3)$$

där

γ_1 och γ = isens resp bergmassans tyngd

H_1 = isens tjocklek

H = djup under bergytan.

På grund av symmetri är de horisontella huvudspänningarna lika stora och således

$$(\sigma_1 + \sigma_2)_H = 2 \cdot \sigma_H = 2 \cdot K \cdot \sigma_V = 2 K \cdot \gamma \cdot H \quad (4)$$

vilket med ekv (3) ger

$$(\sigma_1 + \sigma_2)_H = 2 \left[K_k (\gamma \cdot H + \gamma_{1H_1}) - K_0 \cdot \gamma_{1H_1} \right] \quad (5)$$

Vi väljer - utöver tidigare värden γ och ν - för isen $H_1 = 3000$ m och $\gamma_1 = 9,5$ kN/m³. För de olika krypvärdena

$$K_k = 0,3; 0,6 \text{ och } 1,0$$

har i fig.4 med streckade linjer införts därvid erhållna värden på $(\sigma_1 + \sigma_2)_H$ enligt ekv.(5).

Det existerar naturligtvis inga krypdata för bergmassor under tidrymder av 10 000-tals år eller mera. I geologiska bedömningar har dock sedan långt tillbaka (HEIMS 1878) räknats med att på stora djup krypning kan leda till nära "hydrostatiska" tryckförhållanden i den fasta jordskorpan, dvs $K_k = 1,0$ (VOIGHT 1966 b). Försöker man extrapolera experimentella krypdata från hårda bergarter (COATES et al 1966, WAWERSIK 1974) finner man inget som motsäger att krypningen redan vid belastningar i storleksordningen 30 - 60 MPa under 10 000-tals år kan motsvara relativt höga värden på K_k .

Av fig.3 framgår att den streckade linjen för $K_k = 0,6$ innesluter nästan alla mätvärden från MYRVANG, LI, HILTSCHER och CARLSSON och många av HASTs värden för $H < 200$ m. Linjen för $K_k = 1,0$, dvs fullt utbildat "hydrostatiskt" tryck, omfattar även huvuddelen av HASTs mätvärden.

De aktuella vertikalkryppen under $H_1 = 3000$ m is och upp till $H = 1000$ m bergmassa är ca 30-60 MPa, vilket representerar ca 15-30% av hårda skandinaviska urbergarters brotthållfasthet (utan hänsyn tagen till den hållfasthetsökning som sker under treaxligt tryck (PUSCH 1977)). Det förefaller därför inte sannolikt att krypningen kan ha blivit så fullt utbildad som svarar mot $K_k = 1,0$.

Om HASTs mätvärden, fig.3, av orsaker som tidigare diskuterats, är avsevärt för höga, så synes huvuddelen av de horisontalspänningar, som redovisats, väl kunna tolkas som till större delen framkallade av krypfenomen i bergmassan under inverkan av sena istider.

Om HASTs mätvärden skulle vara både regionalt representativa och korrekta, är det troligt att det utöver de kvarstående spänningarna från sena istider också förekommer betydande kraftfält av annat tektoniskt ursprung.

Vid summering och vägning av alla de argument, som redovisats i avsnitt 1 - 4, finner jag det första tolkningsalternativet vara mest rimligt.

5. SLUTSATSER

Det försök till sammanfattning och kritisk värdering av spänningsmätningar in situ utförda i skandinavisk berggrund, som framlägges i denna rapport, avser bergmekaniska förutsättningar, resultat och tolkning. Avsikten har varit att söka få en uppfattning om olika mätresultats representativitet och rimlighet.

De fakta, argument och resonemang, som redovisats i avsnitt 1 - 4, stöder enligt min bedömning följande slutsatser:

- Enligt vad vi nu vet om bergmassans strukturmekanik förekommer det i regel relativt stora spänningsvariationer inom enskilda block på grund av dels ojämna yttre krafter, dels i vissa fall residuals-spänningar. Tillförlitliga spänningsmätningar måste därför baseras på tredimensionell registrering av deformationer helst i en punkt men i varje fall inom en liten volym (några hundratal cm^3).
- Mätmetoderna enligt Leeman och Leeman - Hiltcher fyller detta krav. Genom att mäta det fullständiga spänningstillståndet (deformationerna) i ett större antal "punkter" (=små volymer) och använda medelvärden kan rimlig utjämning av blockbundna spänningar erhållas.
- Mätmetod enligt Hast och principiellt likartade metoder, där endimensionella mätningar från helt skilda punkter (eller punktserier) kombineras, medför klar risk för övervärdering av spänningarnas storlek. Att så är fallet indikeras inte bara av teoretiska argument utan också av jämförande mätningar och sammanställningar av mätresultat, fig.4.
- De mätningar, som redovisats av MYRVANG, LI, HILTSCHER och CARLSSON, ger sannolikt en mer realistisk bild av berggrundens verkliga - och såväl lokalt som regionalt starkt varierande - spänningstillstånd än HASTs hypotes om mot djupet starkt ökande horisontalspänningar, fig.4.

- HASTs hypotes om att den horisontella maximala skjuvspänningen allmänt skulle vara konstant saknar stöd i såväl hans egna som andras mätresultat, fig.5. Eftersom skjuvbrotthållfastheten ökar nära linjärt med ökande djup på grund av trycket från ovanliggande bergmassor, så är det endast i enstaka undantagsfall som det inte på djup ned till 1000 m föreligger betryggande säkerhetsmarginal mot brott på grund av bergets egenspanningar. Denna slutsats står i klar överensstämmelse med praktisk erfarenhet från gruvbrytning på olika djup.

- Allmänt kan konstateras att mätningarna visar på förekomsten av större horisontaltryckspänningar och horisontella skjuvspänningar än som kan förväntas på rent elasticitetsteoretiska grunder. Huvuddelen av de mätvärden, som erhållits med de mest tillförlitliga mätmetoderna, låter sig väl tolkas som till större delen framkallade av krypfenomen i bergmassan under inverkan av sena istider, fig.4.

- Övervägande skäl talar för att det inte skall innebära några särskilda svårigheter att i svensk berggrund för kvalificerade berggrum med måttlig spännvidd finna sådana förläggningar på 100 - 1000 m djup, där bergets egenspanningar inte skall vålla nämnvärda stabilitetsproblem, drivningssvårigheter eller extrema förstärkningskostnader. Bergspänningsmätning måste då givetvis ingå i den utnyttjade arsenalen av förundersökningsmetoder. Pågående utveckling av metod för spänningsmätning i djupa hål vid Statens Vattenfallsverk är i detta sammanhang av stor betydelse.

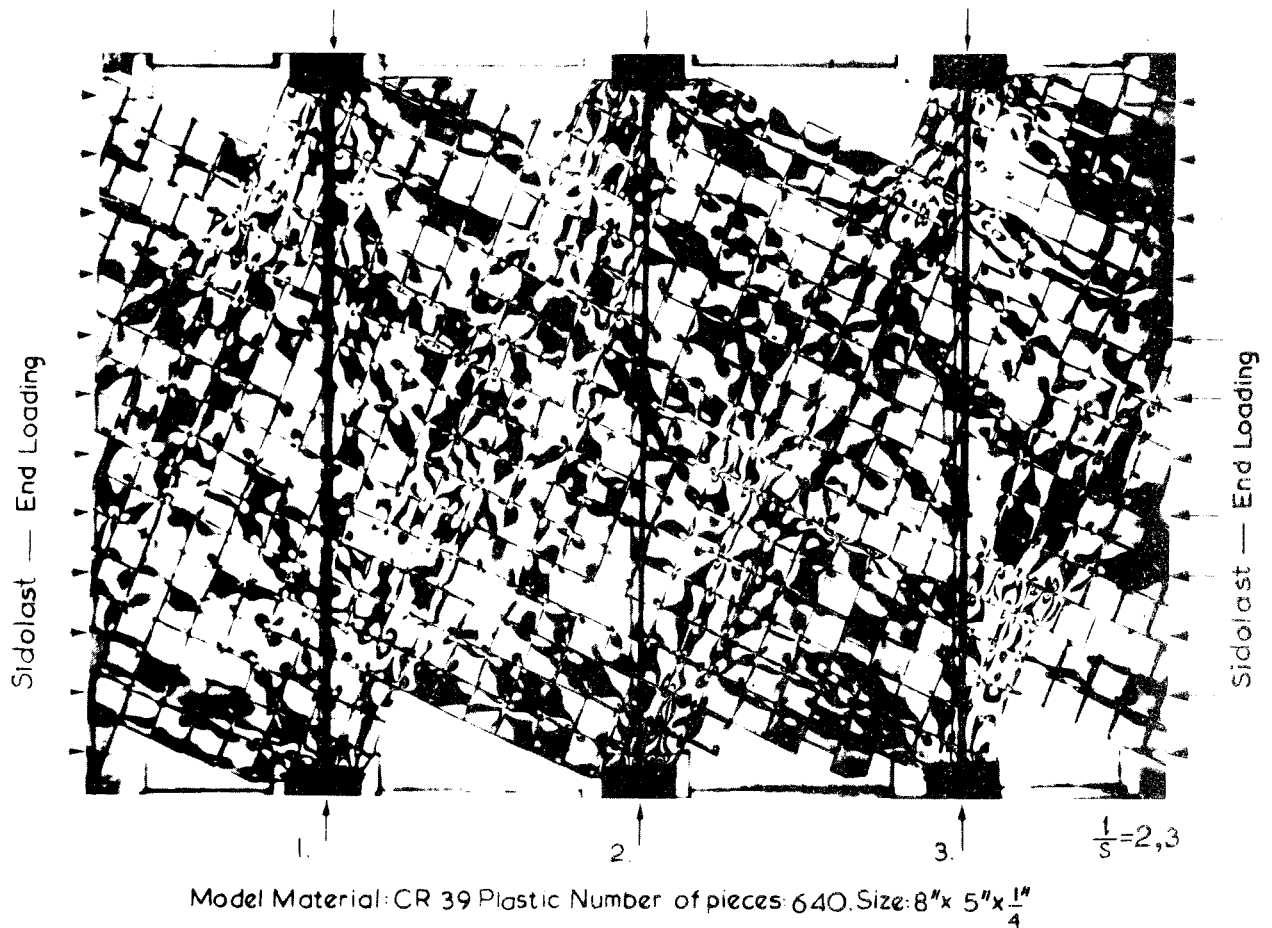
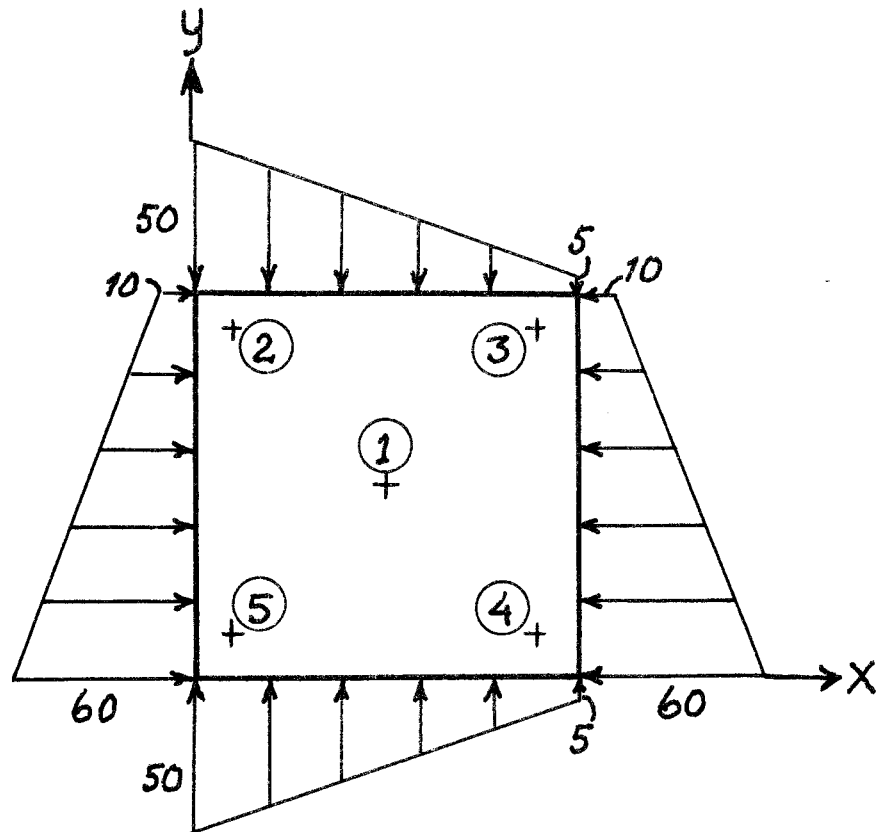


Fig. 1 Spänningsoptiskt försök med plan blockmosaikmodell (LANG 1959). Modellen har belastats med punktlaster vertikalt och jämnt fördelad last horisontellt. Trots att alla "sprickytor" i modellen är glatta medför friktion och dilatans att spänningarna inom de enskilda blocken i de flesta fall varierar starkt.



Summan av huvudspänningarna ($\sigma_x + \sigma_y$) i olika punkter 1 - 5 :

Punkt (n)	$(\sigma_x + \sigma_y)$	$\frac{(\sigma_x + \sigma_y)_n}{(\sigma_x + \sigma_y)_1}$
1	62,5	1,00
2	60,5	0,97
3	24,5	0,39
4	64,5	1,03
5	100,5	1,61

Fig. 2. Grovt schematiserat exempel för att illustrera spänningsvariation i en plan skiva (block) vid ojämn randbelastning.

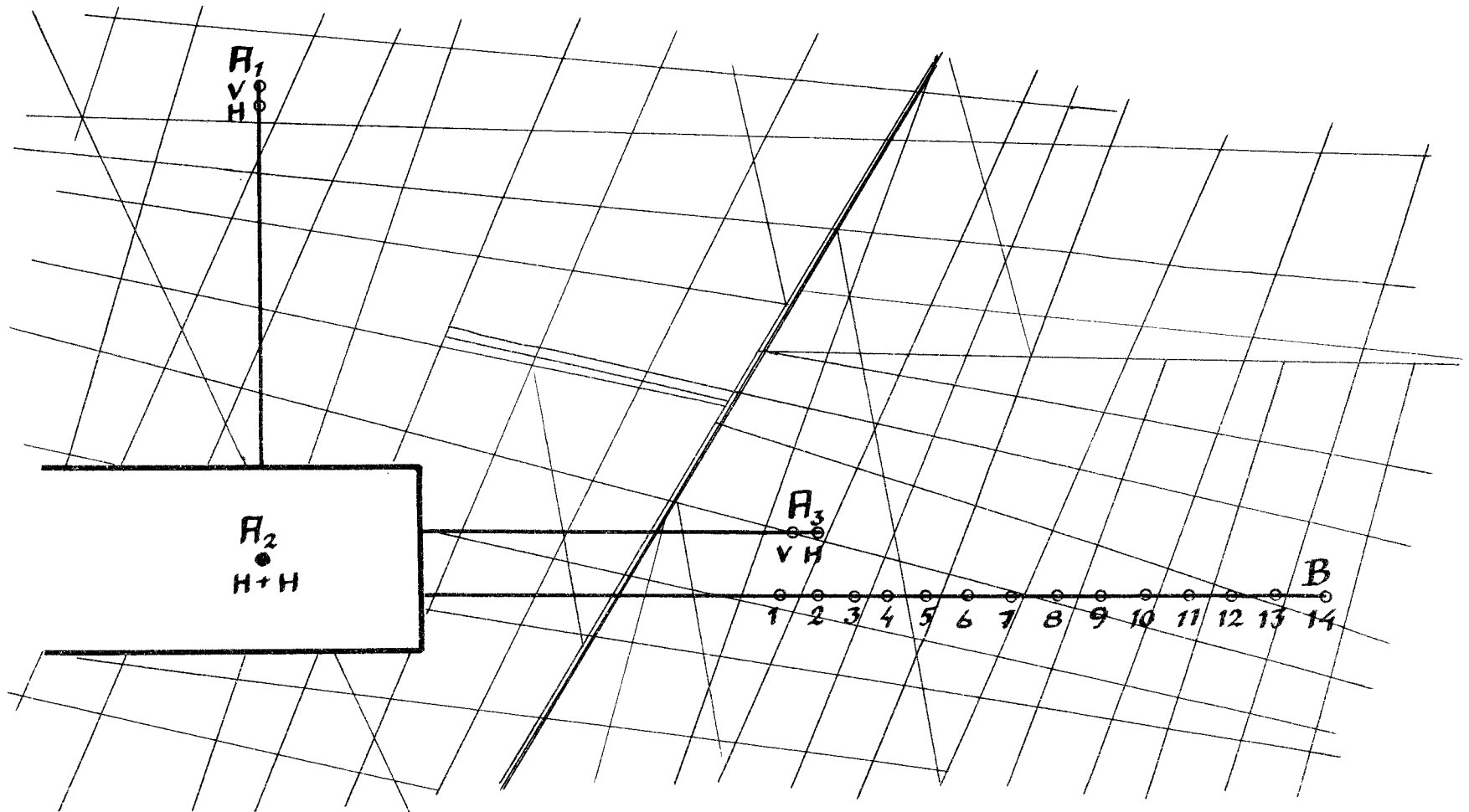


Fig. 3. Principer för mätpunkters placering - vertikalsektion. Vid HASTs mätmetod mäts de tre spänningskomponenterna i minst två av punktparen A_1 ; A_2 och A_3 , dvs A_1-A_2 ; A_1-A_3 eller A_2-A_3 . Vid LEEMANs resp LEEMAN - HILTSCHERS metod mäts alla tre deformationskomponenterna inom ett litet område vid var och en av punkterna B1 - B14 (minst 8 punkter).

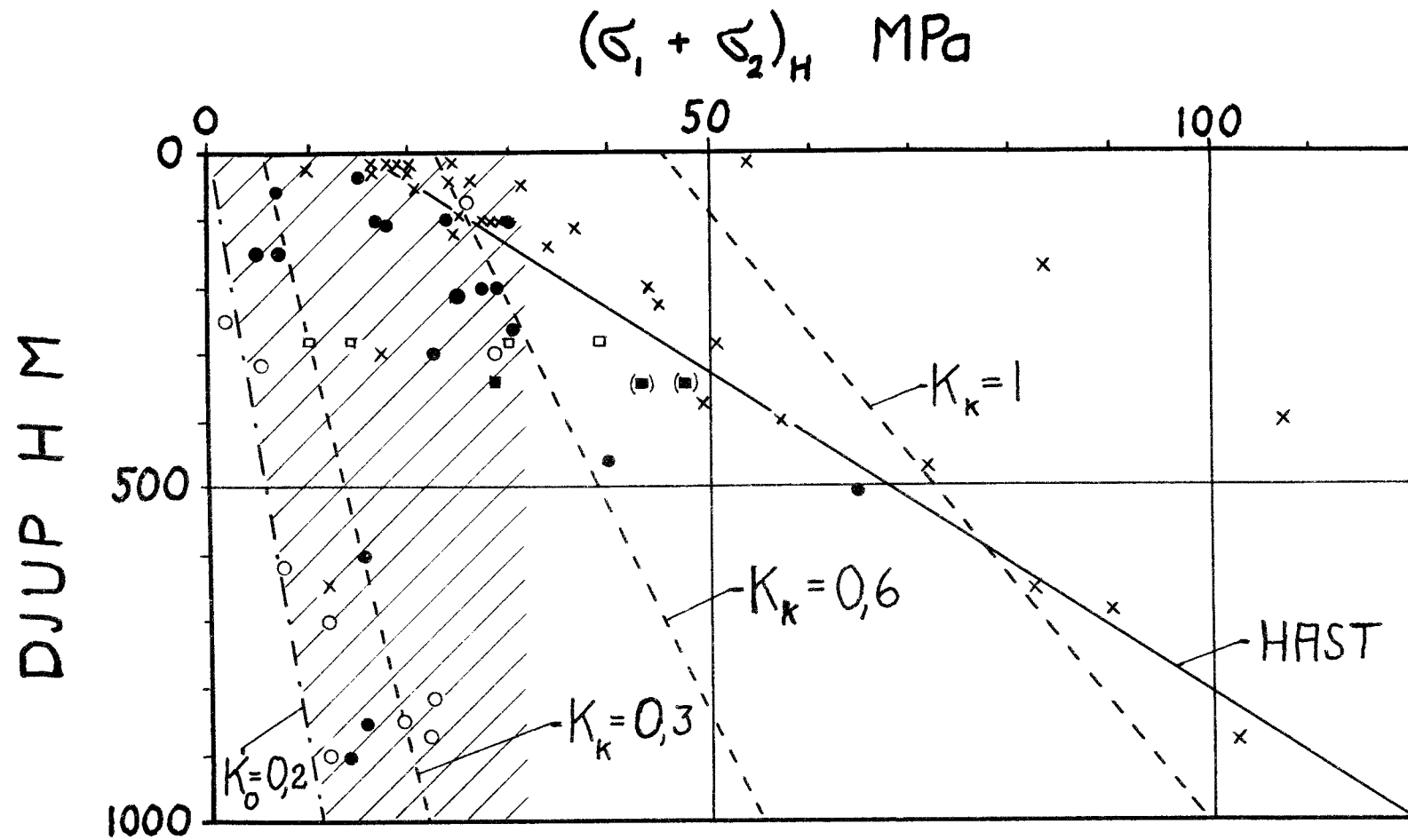


Fig. 4. Mätresultat avseende in situ-spänningar i skandinavisk berggrund redovisade av olika forskare (se Referenser). Summan av de horisontella huvudspänningarna anges som funktion av djup under markytan.

- × HAST
- LI
- MYRVANG
- HILTSCHER
- CARLSSON

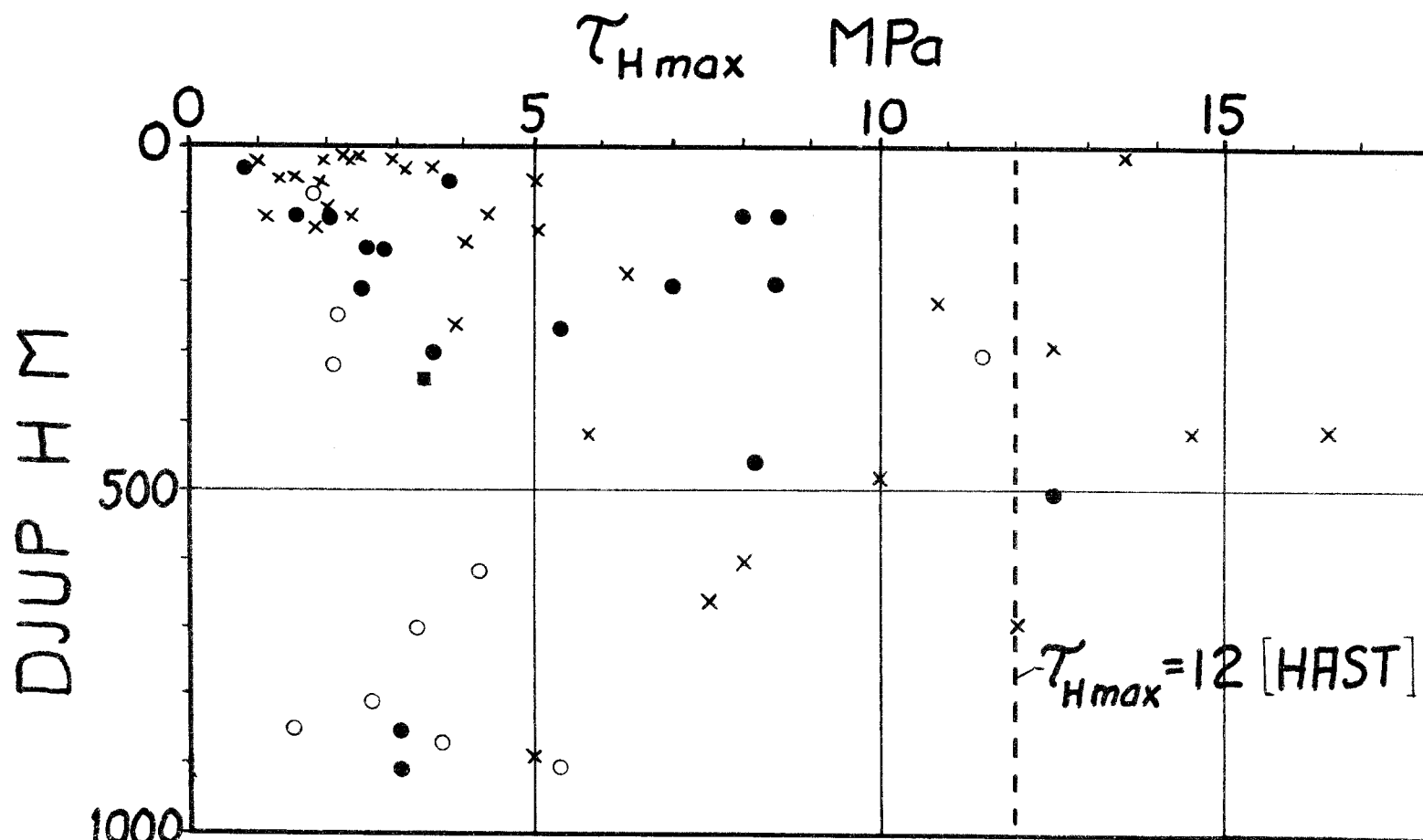
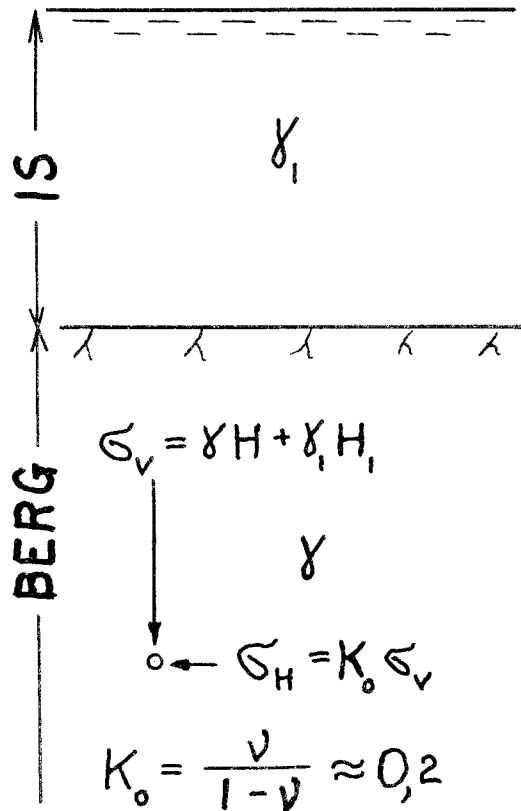


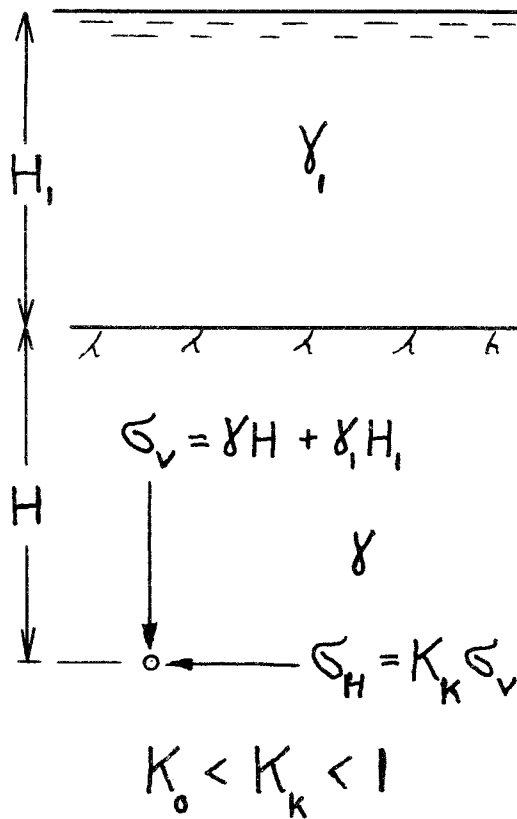
Fig. 5. Mätresultat avseende in situ-spänningar i skandinavisk berggrund redovisade av olika forskare (se Referenser). Största horisontella skjuvspänningen $\tau_{Hmax} = 0,5 (\sigma_1 - \sigma_2)$ anges som funktion av djup under markytan.

- × HAST
- LI
- MYRVANG
- CARLSSON

1. ELASTISKT



2. KRYPNING



3. EFTER IS-SMÄLTNING

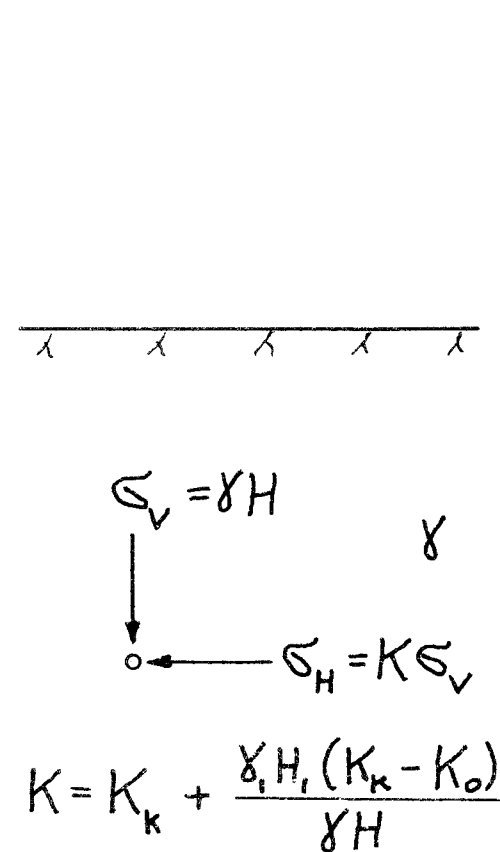


Fig. 6. Modell för uppskattning av kvarstående krypspänningar efter istid
(efter VOIGHT 1966 b).

REFERENSER

- Barton,N; Lien,R. och Lunde,J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mechanics, Springer Verlag, Vol.6, p.189-236.
- Bergman,S.G.A. 1965a. Funktionell bergklassificering, IVA Meddelande nr 142,p.115-123.
- Bergman,S.G.A. 1965b. Bergförstärkningar med samverkan mellan berg, bult och armerad ytbetong, IVA meddelande nr 142, p.221-230.
- Carlsson,H. 1977. Bergspänningsmätning i Stripa gruva, Högskolan i Luleå, Avd för bergmekanik, 23 p.
- Coates,D.F. och Parsons,R.C. 1966. Experimental Criteria for Classification of Rock Substances, Int.Journ. Rock.Mech. Min.Sci, Vol.3, pp 181-189.
- Denkhaus,H. 1966. Residual stresses in rock masses, General Report Theme 4, Proc. I S R M 1:st Congress, Lissabon, Vol. III p.312-319.
- Goodman,R. 1966. On the distribution of stresses around circular tunnels in non-homogeneous rocks, Proc. I S R M 1:st Congress, Lissabon, Vol. II p 249-255.
- Hast,N. 1958. The measurement of rock pressure in mines, Sveriges Geologiska Undersökning, Serie C:560.
- Hast,N. 1965. Spänningstillståndet i den fasta jordskorpanns övre del, IVA-meddelande nr.142, Stockholm, p.13-23.
- Hast,N. 1974. The State of Stress in the Upper Part of the Earth's Crust as Determined by Measurements of Absolute Rock Stress, Naturwissenschaften 61, p.468-475.

- Heim,A. 1878. Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung im Anschluss an die geologische Monographie der Todi-Windgallen-Gruppe, Schwabe, Basel.
- Herget,G. 1971. Variation of Rock Stresses with Depth at a Canadian Iron Mine, Dep. Energy, Mines and Resources, Min. Res. Center report MR 71/96-ID, Ottawa.
- Hiltscher,R. 1970. Några allmänna synpunkter angående bergtrycksmätning, IVA-rapport nr.29, Bergmek. diskussionsmöte 13 febr, Stockholm, p 15-16.
- Hiltscher,R. 1972. Anwendung der Gebirgsspannungsmessung bei der Schwedischen Staatlichen Kraftwerksverwaltung, Int. Symp. für Untertagbau, Luzern, p.555-560.
- Hiltscher,R. 1974 a. Bergspänningsmätning. Synpunkter på dagens teknik och utvecklingstendenser, BeFo Bergmekanikdag 15 febr, p. 94-103.
- Hiltscher,R. 1974 b. Studium och jämförelse av olika metoder för bergtrycksmätning använda i Norden, Svenska Gruvföreningen, Gruvforskningen serie B, Nr.184, Stockholm (tills m.Li, B, och Matikainen,R.).
- Hiltscher,R. och Ingevald,K. 1970. Bergtrycksmätning inom Statens Vattenfallsverk, IVA-rapport nr.29, Bergmek. diskussionsmöte 13 febr, Stockholm p.33-41.
- Lang,T.A. 1959. Underground Experience in the Snowy Mountains, Australia, Proc.2:nd Protective Construction Symposium, Rand Corp, Santa Monica, USA, vol.II p.767-854.
- Li,B. 1970 a. Natural Stress-Values Obtained in Different Parts of the Fennoscandian Rock Masses, Proc. I S R M 2:nd Congress, Belgrad, vol.I:28.

- Li, B., 1970 b. Erfaring med tredimensjonal målecelle for bergtrykksmålinger, IVA-rapport nr.29, Bergmek. diskussionsmöte 13 febr, Stockholm, p.17-24.
- Matikainen, R., 1970. Bergtrykksmålinger ved Lojo kalkverk AB, IVA-rapport nr.29, Bergmek. diskussionsdag 13 febr, Stockholm, p.43-52 (med tilhørende diskussion av Hansági, Hiltcher och Li).
- Myrvang, A., 1970. Bergtrykksmålinger med "door-stoppers" og tredimensjonal målecelle ved Rødsand gruber, IVA-rapport nr.29, Bergmek. diskussionsmöte 13 febr, Stockholm, p.25-31.
- Myrvang, A., 1976. Practical Use of Rock Stress Measurements in Norway, Symposium on Investigation of Stress in Rock-Advances in Stress Measurements, Sydney 11-13 Aug. p.92-99.
- Myrvang, A., 1977. Rapport vedrørende bergspänningsmålinger ved Næsliiden gruve i tiden 3.5 - 11.5.1977, NTH Institutt for gruvedrift, Trondheim.
- Mörner, N.A., 1977. Rörelser och instabilitet i den svenska berggrunden, KBS Teknisk Rapport nr.18.
- Pusch, R., 1977. The influence of rock movement on the stress/strain situation in tunnels or bore holes with radioactive canisters embedded in a bentonite/quartz buffer mass, KBS Teknisk rapport nr.22.
- Stephansson, O., 1974. Residuala spänningar vid bergtryck, BeFo Bergmek.diskussionsmöte 15 febr, Stockholm, p.134-141 (med tilhørende diskussion av Hiltcher, Bergman, Li och Krauland).
- Voight, B., 1966 a. Restspanningen in Gestein, Proc. I S R M 1:st Congress, Lissabon, Vol. II p.45-50.

Voight,B. 1966 b. Beziehung zwischen grossen horizontalen Spannungen im Gebirge und der Tektonik und der Abtragung,
Proc. I S R M 1:st Congress, Lissabon, vol.II p.51-56.

Voight,B. 1966 c. Interpretation of In Situ Stress Measurements,
Proc. I S R M 1:st Congress, Lissabon, Vol.III p.332-348.

Voight,B. och St. Pierre, 1974. Stress History and Rock Stress,
Proc. I S R M 3:rd Congress, Denver, vol.II A,p.580-582.

Wawersik,W.R. 1974. Time-Dependent Behaviour of Rock in Compression,
Proc. I S R M 3:rd Congress, Denver, Vol.II A p.357-363.

FÖRTECKNING ÖVER KBS TEKNISKA RAPPORTER

- 01 Källstyrkor i utbränt bränsle och högaktivt avfall från en PWR beräknade med ORIGEN
Nils Kjellbert
AB Atomenergi 77-04-05
- 02 PM angående värmeledningstal hos jordmaterial
Sven Knutsson
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-04-15
- 03 Deponering av högaktivt avfall i borrhål med buffertsubstans
Arvid Jacobsson
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-05-27
- 04 Deponering av högaktivt avfall i tunnlar med buffertsubstans
Arvid Jacobsson
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-06-01
- 05 Orienterande temperaturberäkningar för slutförvaring i berg av radioaktivt avfall, Rapport 1
Roland Blomqvist
AB Atomenergi 77-03-17
- 06 Groundwater movements around a repository, Phase 1, State of the art and detailed study plan
Ulf Lindblom
Hagconsult AB 77-02-28
- 07 Resteffekt studier för KBS
Del 1 Litteraturgenomgång
Del 2 Beräkningar
Kim Ekberg
Nils Kjellbert
Göran Olsson
AB Atomenergi 77-04-19
- 08 Utlakning av franskt, engelskt och kanadensiskt glas med högaktivt avfall
Göran Blomqvist
AB Atomenergi 77-05-20

- 09 Diffusion of soluble materials in a fluid filling a porous medium
Hans Häggblom
AB Atomenergi 77-03-24
- 10 Translation and development of the BNWL-Geosphere Model
Bertil Grundfelt
Kemakta Konsult AB 77-02-05
- 11 Utredning rörande titans lämplighet som korrosionshärdig kapsling för kärnbränsleavfall
Sture Henriksson
AB Atomenergi 77-04-18
- 12 Bedömning av egenskaper och funktion hos betong i samband med slutlig förvaring av kärnbränsleavfall i berg
Sven G Bergström
Göran Fagerlund
Lars Rombén
Cement- och Betonginstitutet 77-06-22
- 13 Urlakning av använt kärnbränsle (bestrålad uranoxid) vid direktdeponering
Ragnar Gelin
AB Atomenergi 77-06-08
- 14 Influence of cementation on the deformation properties of bentonite/quartz buffer substance
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 77-06-20
- 15 Orienterande temperaturberäkningar för slutförvaring i berg av radioaktivt avfall
Rapport 2
Roland Blomquist
AB Atomenergi 77-05-17
- 16 Översikt av utländska riskanalyser samt planer och projekt rörande slutförvaring
Åke Hultgren
AB Atomenergi augusti 1977
- 17 The gravity field in Fennoscandia and postglacial crustal movements
Arne Bjerhammar
Stockholm augusti 1977
- 18 Rörelser och instabilitet i den svenska berggrunden
Nils-Axel Mörner
Stockholms Universitet augusti 1977
- 19 Studier av neotektonisk aktivitet i mellersta och norra Sverige, flygbildsgenomgång och geofysisk tolkning av recenta förkastningar
Robert Lagerbäck
Herbert Henkel
Sveriges Geologiska Undersökning september 1977

- 20 Tektonisk analys av södra Sverige, Vättern - Norra Skåne
Kennert Röshoff
Erik Lagerlund
Lunds Universitet och Högskolan Luleå september 1977
- 21 Earthquakes of Sweden 1891 - 1957, 1963 - 1972
Ota Kulhánek
Rutger Wahlström
Uppsala Universitet september 1977
- 22 The influence of rock movement on the stress/strain
situation in tunnels or bore holes with radioactive con-
sistors embedded in a bentonite/quartz buffer mass
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1977-08-22
- 23 Water uptake in a bentonite buffer mass
A model study
Roland Pusch
Högskolan i Luleå 1977-08-22
- 24 Beräkning av utlakning av vissa fissionsprodukter och akti-
nider från en cylinder av franskt glas
Göran Blomqvist
AB Atomenergi 1977-07-27
- 25 Blekinge kustgnejs, Geologi och hydrogeologi
Ingemar Larsson KTH
Tom Lundgren SGI
Ulf Wiklander SGU
Stockholm, augusti 1977
- 26 Bedömning av risken för fördröjt brott i titan
Kjell Pettersson
AB Atomenergi 1977-08-25
- 27 A short review of the formation, stability and cementing
properties of natural zeolites
Arvid Jacobsson
Högskolan i Luleå 1977-10-03
- 28 Värmeledningsförsök på buffertsubstans av bentonit/pitesilt
Sven Knutsson
Högskolan i Luleå 1977-09-20
- 29 Deformationer i sprickigt berg
Ove Stephansson
Högskolan i Luleå 1977-09-28
- 30 Retardation of escaping nuclides from a final depository
Ivars Neretnieks
Kungliga Tekniska Högskolan Stockholm 1977-09-14
- 31 Bedömning av korrosionsbeständigheten hos material avsedda
för kapsling av kärnbränsleavfall. Lägesrapport 1977-09-27
samt kompletterande yttranden.
Korrosionsinstitutet och dess referensgrupp

- 42 Säkerhet vid hantering, lagring och transport av använt kärnbränsle och förglasat högaktivt avfall
Ann Margret Ericsson
Kemakta november 1977
- 43 Transport av radioaktiva ämnen med grundvatten från ett bergförvar
Bertil Grundfelt
Kemakta november 1977
- 44 Beständighet hos borsilikatglas
Tibor Lakatos
Glasteknisk Utveckling AB
- 45 Beräkning av temperaturer i ett envånings slutförvar i berg för förglasat radioaktivt avfall Rapport 3
Roland Blomqvist
AB Atomenergi 1977-10-19
- 46 Temperaturberäkningar för använt bränsle
Taivo Tarandi
VBB
- 47 Teoretiska studier av grundvattenrörelser
Preliminär rapport oktober 1977
Slutrapport februari 1978
Lars Y Nilsson
John Stokes
Roger Thunvik
Inst för kulturteknik KTH
- 48 The mechanical properties of the rocks in Stripa, Kråkemåla, Finnsjön and Blekinge
Graham Swan
Högskolan i Luleå 1977-09-14
- 49 Bergspänningsmätningar i Stripa gruva
Hans Carlsson
Högskolan i Luleå 1977-08-29
- 50 Lakningsförsök med högaktivt franskt glas i Studsvik
Göran Blomqvist
AB Atomenergi november 1977
- 51 Seismotectonic risk modelling for nuclear waste disposal in the Swedish bedrock
F Ringdal
H Gjöystdal
E S Hysebye
Royal Norwegian Council for scientific and industrial research
- 52 Calculations of nuclide migration in rock and porous media, penetrated by water
H Häggblom
AB Atomenergi 1977-09-14

- 53 Mätning av diffusionshastighet för silver i lera-sand-blandning
Bert Allard
Heino Kipatsi
Chalmers tekniska högskola 1977-10-15
- 54 Groundwater movements around a repository
- 54:01 Geological and geotechnical conditions
Håkan Stille
Anthony Burgess
Ulf E Lindblom
Hagconsult AB september 1977
- 54:02 Thermal analyses
Part 1 Conduction heat transfer
Part 2 Advective heat transfer
Joe L Ratigan
Hagconsult AB september 1977
- 54:03 Regional groundwater flow analyses
Part 1 Initial conditions
Part 2 Long term residual conditions
Anthony Burgess
Hagconsult AB oktober 1977
- 54:04 Rock mechanics analyses
Joe L Ratigan
Hagconsult AB september 1977
- 54:05 Repository domain groundwater flow analyses
Part 1 Permeability perturbations
Part 2 Inflow to repository
Part 3 Thermally induced flow
Joe L Ratigan
Anthony S Burgess
Edward L Skiba
Robin Charlwood
- 54:06 Final report
Ulf Lindblom et al
Hagconsult AB oktober 1977
- 55 Sorption av långlivade radionuklider i lera och berg
Del 1 Bestämning av fördelningskoefficienter
Del 2 Litteraturgenomgång
Bert Allard
Heino Kipatsi
Jan Rydberg
Chalmers tekniska högskola 1977-10-10
- 56 Radiolys av utfyllnadsmaterial
Bert Allard
Heino Kipatsi
Jan Rydberg
Chalmers tekniska högskola 1977-10-15

- 57 Stråldoser vid haveri under sjötransport av kärnbränsle
Anders Appelgren
Ulla Bergström
Lennart Devell
AB Atomenergi 1978-01-09
- 58 Strålrisker och högsta tillåtliga stråldoser för människan
Gunnar Walinder
FOA 4 november 1977
- 59 Tectonic lineaments in the Baltic from Gävle to Simrishamn
Tom Flodén
Stockholms Universitet 1977-12-15
- 60 Förarbeten för platsval, berggrundsundersökningar
Sören Scherman
- Berggrundvattenförhållande i Finnsjöområdets nordöstra del
Carl-Erik Klockars
Ove Persson
Sveriges Geologiska Undersökning januari 1978
- 61 Permeabilitetsbestämningar
Anders Hult
Gunnar Gidlund
Ulf Thoregren
- Geofysisk borrhålsmätning
Kurt-Åke Magnusson
Oscar Duran
Sveriges Geologiska Undersökning januari 1978
- 62 Analyser och åldersbestämningar av grundvatten på stora djup
Gunnar Gidlund
Sveriges Geologiska Undersökning 1978-02-14
- 63 Geologisk och hydrogeologisk grunddokumentation av
Stripa försöksstation
Andrei Olkiewicz
Kenth Hansson
Karl-Erik Almén
Gunnar Gidlund
Sveriges Geologiska Undersökning februari 1978
- 64 Spänningsmätningar i Skandinavisk berggrund - förutsättningar,
resultat och tolkning
Sten G A Bergman
Stockholm november 1977
- 65 Säkerhetsanalys av inkapslingsprocesser
Göran Carleson
AB Atomenergi 1978-01-27
- 66 Några synpunkter på mekanisk säkerhet hos kapsel för
kärnbränsleavfall
Fred Nilsson
Kungl Tekniska Högskolan Stockholm februari 1978