

SveBeFo Rapport 34

FÖRORD

I SveBeFos arbete för att bättre förstå sprängämnens verkan i praktisk tillämpning är en viktig uppgift att kunna registrera tryckförloppet under detonationen i ett sprängborrhål. Uppgiften är svår eftersom det är fråga om ett mycket snabbt förlopp med mycket höga tryck. Det instrument som ska användas måste placeras i sprängborrhålet, innehålla en sensor som ger korrekta data som kan fångas upp och samtidigt klara påfrestningarna av detonationen. Föreliggande rapport är en redovisning av arbetet med att utveckla ett sådant instrument, den s k LHM-cellen (Lägesbestämd Hydrostatisk Mätkopp), från idéstadiet till en fungerande prototyp, som provats i borrhål i stenblock. I och med detta utvecklingsarbete har vi nu tillgång till en teknik som inledningsvis använts vid fältförsök av Shulin Nie med syftet att jämföra praktiska mätresultat med teoretiska modeller över sambanden mellan sprängämnens energiinnehåll och deras expansionsförmåga. Ett av syftena med dessa försök är att bättre förklara betydelsen av sprängämnets kopplingsgrad vid skonsam sprängning, dvs hur stor del av borrhålsdiametern som upptas av sprängämnet, en faktor som experimentellt visats ha stor inverkan på sprickbilden i kvarstående berg. Dessa försök avrapporteras av Nie sommaren 99 och fortsatta försök pågår för närvarande.

Härmed framförs ett tack till projektgruppen, dvs Gunnar Persson och de personer som medverkat med råd och stöd under en lång projektperiod, särskilt Ingvar Bergqvist, Dyno Nobel, Torbjörn Naarttijärvi och senare Anders Nordqvist, Kimit, samt Shulin Nie vid SveBeFo.

Stockholm i juni 1999

Tomas Franzén

SAMMANFATTNING

I rapporten redovisas resultat från arbetet med utvecklingen av en ny mätmetod för forskningsändamål, benämnd LHM (Lägesbestämd Hydrostatisk Mätkopp). Denna skall göra det möjligt att mäta hela trycktidförloppet i botten på fulladdade spränghål.

LHM-mätningar skall ge ökat kunnande om sprängämnens verkansegenskaper och möjliggöra effektivare bergbrytning. Resultaten förväntas också ge ett förbättrat underlag för datorsimulering av trycktidförloppet i borrhålet med hänsyn tagen till sprickutbredning och fragmentering.

Med mätmetoden kan man bl a vid detonationsförlopp studera skademekanism och energiöverföring samt utföra kalibrering av datorsimulering med t ex brinnmodeller.

SUMMARY

Measurement of the borehole pressure have rarely been carried out in rock blasting practice, due to the lacking of feasible methods. This report presents a new measuring method developed for this purpose. The method is named as LHM or Location-fixed Hydrostatic Measuring-cup and is designed to measure the borehole pressure history in the bottom of fully charged blast holes.

Through the pressure measurements by the LHM method, knowledge will be gained on the performances of explosives, which will lead to more efficient rock blasting. The pressure measurements will also provide us an excellent database for the computer simulation of the borehole pressure history and its importance on the damage and rock fragmentation.

With the help of the LHM method, one can study among other things the damage mechanism and energy partition in rock blasting processes. The method is also a good tool to calibrate the description of detonation process in computer codes, for example, the burning models.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING	Sida
1. INLEDNING	1
2. MÅLSÄTTNING	2
3. PROJEKTUPPLÄGGNING OCH GENOMFÖRANDE	2
3.1 Projektorganisation	2
3.2 Principen för LHM-cellen	2
3.3 Konceptstudie	3
3.4 Litteraturstudier och diskussioner	4
3.5 LHM-cellen	7
3.5.1 Mätkoppen	7
3.5.2 Tryckmediet	8
3.5.3 Luft i tryckmediet	9
3.5.4 Rörelser i tryckmediet	9
3.5.5 Kabelgenomföring i LHM-cellen	9
3.6 Bergmontage	10
3.6.1 Borrning	10
3.6.2 Håltätning	11
3.7 Givare	11
3.7.1 Givartyper	11
3.7.2 Kolmassamotståndet	12
3.7.3 Tryckgivarförstärkare och mätvärdesregistrering	12
3.7.4 Elektromagnetisk puls	13

3.8	Givarkalibrering	14
3.8.1	Vår kalibrering	14
3.8.2	Andra forskares kalibrering	16
3.8.3	Manganinkalibrering	16
3.9	Kanonprov	16
3.9.1	Kanonen	17
3.9.2	Givarkonstruktioner	17
3.9.3	Impulsjämförelse	18
3.9.4	DYNA2D - beräkningar	18
3.10	Pallprov med LHM-cellen	19
3.10.1	Normalhål	19
3.10.2	Ej lägesbestämd	19
3.10.3	Flyttblock	20
3.11	Fältmätning	20
3.11.1	Granitblock i Atlas Copcos provgruva	20
3.11.2	Fältblock	21
4.	SLUTSATSER	21
5.	LHM 2	21
6.	ERKÄNNANDEN	22
7.	REFERENSER	23
	JÄMFÖRELSETABELL FÖR TRYCKENHETER	25
	FIGURER 1 - 49	26

1 INLEDNING

Inom bergsprängningstekniken finns stora problem med detaljerad uppföljning av sprängningsförloppet. Det resultat som kan observeras efteråt ger naturligtvis viss information om händelseförloppet under sprängningsfasen, men det är inte tillräckligt. Anledningen till dessa svårigheter är dels den korta tidsperiod under vilken sprängningsförloppet pågår, dels den svåra mät- och observationstekniska miljö som råder runt en sprängplats.

De mätmetoder vi har till vårt förfogande för att följa faserna vid bergbrytning är väl etablerade såsom detonationshastighetsmätning, vibrationsmätning och höghastighetsfilmning. Vid skonsam sprängning använder vi också en ny teknik där vi sågar ut en skiva ur berget runt sprängborrhålet och karterar de sprickor som uppstått. Olsson och Bergqvist /1/.

Termokemiska beräkningar på sprängämnesrecept med hjälp av dator ger de teoretiska värdena för bl a explosionsvärmets tryck och temperatur. Men vi vill gärna kunna mäta och styra sprängämnets verkansegenskaper så att bästa resultat erhålles. Det kan t ex gälla att styra styckefallet efter olika önskemål eller förhindra att skador uppstår på det kvarstående berget. Ibland kan två sprängämnen med samma energiinnehåll ha helt skilda verkansegenskaper och man antar då att trycktidförloppet i borrhålet är olika, något som vi tyvärr ej kunnat mäta.

Vid de företag och organisationer som arbetar med bergbrytningsteknik finns därför behov av bättre teknik för att följa upp detonationsförlopp av sprängsalvor. I produktionen kan sådan teknik användas för kvalitetskontroll och inom forskning och utveckling för att bättre detektera och följa upp dagens sprängtekniska problem. Förslag till lösningar kan då snabbare kontrolleras.

Då sprängämnet detonerar i borrhålet sänds först en stötvåg ut i berget vilken genom tryck- och dragvågor påverkar berget så att sprickor uppstår inne i berget omkring borrhålet. Spränggaserna med sitt höga tryck fortsätter sedan att belasta borrhålsväggen så att den tänjs ut och sprickor uppstår. Gastrycket kastar sedan isär det uppspräckta berget på, förhoppningsvis, det sätt bergsprängaren tänkt sig.

Uppfattningarna om hur det detonerade sprängämnets energi fördelas mellan stötvågen och spränggasen varierar mycket, allt ifrån 1:20 till 1:3. Detta beroende på sprängämnestyp och användningsförhållande men också mycket på vederbörande bedömares egen övertygelse. Genom vibrationsmätningar på det omgivande berget kan man få en uppfattning om energimängden i stötvågen men hela trycktidförloppet i fulladdade sprängborrhål har inte varit möjligt att mäta.

I mycket svagt laddade borrhål t ex vid konturskjutning har mätning av trycktidförloppet eller delar därav kunnat göras. Bl a har SveDeFo (numera del av SveBeFo) gjort ett arbete som redovisas i kap. 3.4.

2. MÅLSÄTTNING

En ny metod skulle utvecklas som möjliggjorde mätning av hela trycktidförloppet i botten på sprängborrhål vid sprängning med de högexplosiva sprängämnen som används i våra bergarter. Trycket från atmosfärtryck upp till spränggastryck och åter till atmosfärtryck skulle mätas.

I projektets inledning var huvudändamålet med mätmetoden att kunna jämföra arbetsförmågan för olika bulksprängämnen vid grovhålsskjutning. Senare under projektets gång har våra intressenters önskemål mer inriktats på mätning av trycktidförloppet i klenare borrhålsdiametrar. Detta speciellt för att metoden skall vara till hjälp inom de stora projekt SveBeFo driver för att kunna beräkna och styra sprickbildningen i berget runt spränghålet.

3. PROJEKTUPPLÄGGNING OCH GENOMFÖRANDE

3.1 Projektorganisation

Projektet drevs tillsammans med Kimit AB och Dyno Nobel AB med en referensgrupp bestående av:

Ingvar Bergqvist, Dyno Nobel AB
 Torbjörn Naarttijärvi, Kimit AB t o m 1996-09-30
 Anders Nordqvist, Kimit AB fr o m 1996-10-01
 Shulin Nie, SveBeFo fr o m 1996-10-01
 Gunnar Persson, SveBeFo, projektledare

3.2 Principen för LHM-cellen

Den lägesbestämda hydrostatiska mätkoppen skall fungera som ett skydd för tryckgivare placerade nära dess botten. Se fig. 1. Det är viktigt att mätkoppen är lägesbestämd då tillhörande kablage annars kan skadas och tryckförlopp förvrängas. Både botten och mantelyta skall ha ett stabilt mothåll under större delen av tryckförloppet för att undvika deformation och bräckage av mätkoppens väggar.

Mätkoppen måste vara fylld med en vätska så att den kan fungera enligt Pascals hydrostatiska princip: "Ett tryck som utövas på en del av en vätskeyta, fortplantar sig med oförminskad styrka till alla vätskans delar". Ytan på den trycksatta vätskan hindrar partiklar och spränggas att tränga in i mätkoppen och skada tryckgivaren.

Den lägesbestämda hydrostatiska mätkoppen med inmonterad tryckgivare benämnes, för enkelhets skull, i fortsättningen LHM-cellen.

Botten av ett sprängborrhål kan, om berget är något så när helt, anses vara lägesbestämd och därmed utgöra en lämplig placeringsplats för en LHM-cell. Om det är trycktidförloppet nere i sprängborrhålet man vill mäta får denna placering anses vara idealisk ur mätsynpunkt. Det blir dock något besvärligt att få ut signalledningarna. Andra placeringar beskrivs i kap. 3.6.

3.3 Konceptstudie

Idén med LHM-cellen föddes hos författaren redan 1977 men det dröjde några år innan utvecklingsarbetet tog sin början. Vid ett besök i USA våren 1982 på inbjudan av Columbia Scientific Industries Co., för utveckling av en gasanalysator i ett forskningsprojekt om spränggas, besökte förf. även Bureau of Mines i Pittsburgh. Förf. träffade då Richard W. Watson som är mycket känd för sin uppfinning av en metod för mätning av stötvågstryck med kolmassamotstånd /2/. Han ansåg idén att skydda en trycksensor i en vätskefylld kopp i botten på ett sprängborrhål vara mycket intressant och värd att prova.

Den 18 januari 1983 fick förf. möjlighet att göra ett första pilotförsök och prova delar av idén med LHM-cellen i den provuppställning som fig. 2 visar. På ett 500 mm långt stålrör med ytterdiameter 125 mm och 15 mm tjock vägg svetsades en 60 mm tjock bottenplatta. I mitten av denna platta gjordes en trycktålig labyrinthgenomföring så att ett $1/8$ W, $470\ \Omega$ kolmassamotstånd kunde monteras på bottenplattan inne i stålröret. Kolmassamotståndet var av den typ Watson använde vid mätning av stötvågstryck. Dessa motstånd minskar sin resistans när de utsätts för tryck. Hela röret fylldes med vatten och en Dynamexpatron 25 x 200 mm, vikt ca. 125 g, hängdes upp mitt i röret och initierades med en VA 8-sprängkapsel.

Resultatet syns på fig. 3 som visar bottenplattan och en skärva av det sprängda röret. Mitt på bottenplattan står $470\ \Omega$ - motståndet helt oskadat. Motståndet var inkopplat via en mätbrygga till en transientrecorder som tyvärr vägrade att fungera. Någon registrering av trycktidförloppet erhöles inte men det sprängda stålröret indikerar att ett mycket högt tryck rått inne i röret.

”Fenomenet” med det sprängda stålröret som hade omslutit det oskadade kolmotståndet diskuterades en hel del men några vidare försök gjordes inte då. Den skepsis författaren mötte på idéstadiet och i det inledande utvecklingsarbetet har naturligtvis sin förklaring i det faktum att LHM-metoden ligger mycket nära det omöjliga.

1991 påbörjades aktivt projektarbete inom dåvarande SveDeFos ramprogram för att utveckla en lägesbestämd hydrostatisk mät kopp, LHM-cell, med förf. som projektledare. Den referensgrupp som då tillsattes gjorde allt för att stötta projektarbetet och uppmuntra under besvärliga utvecklingsfaser.

3.4 Litteraturstudier och diskussioner

Många metoder att bedöma ett sprängämnes verkansegenskaper har provats sedan Alfred Nobel introducerade sin mixtur; dynamiten som en säkrare form att använda nitroglycerin. För maximal tryckmätning användes tidigt stukmätare där en cylinder eller kula av bly eller koppar placerades mellan ett städ och en tryckkolv. Sprängämnets stötvågstryck pressade mot kolven och man kunde efteråt mäta deformationsgraden på cylindern eller kulan. Även blymembran inspända i stabila ramar och utsatta för stötvågen har använts som maximaltryckmätare.

När sedan elektroniska instrument kom till användning inom sprängforskningen blev det möjligt att mäta tryckförlopp kontinuerligt. De tryckgivare som användes utnyttjade som kännande element trådtöjningsgivare samt induktiva och kapacitiva givare i en mängd olika utföranden. Dessa givare var relativt stora mekaniska konstruktioner som genom sin tröghet kunde förvränga avbildningen av tryckförloppet.

Först med den piezoelektriska givaren minskades den rörliga massan och stigtiden blev betydligt kortare. För tryckmätning i vatten användes givare av turmalinkristall, vilken endast skyddas av en tunn plasthinna som gör att kopplingen till omgivande vätska blir optimal. Turmalinkivare mäter tryck upp till ca 0,1 GPa med stigtid omkring 1 μ s. Vi har valt att använda SI-enheten Pascal, Pa, för tryck och visar på sida 25 en jämförelsetabell för tryckenheter. Givare med kvartskristall och känslighet endast åt ett håll, där ett membran med några mm^2 yta känner av trycket, kan mäta upp till 1 GPa. Egenfrekvensen är 150 kHz med en stigtid av 2 μ s. Givare med kristaller har en kort tidskonstant d v s de har svårighet att mäta långsamma tryckförändringar.

Kristallgivare kan inte användas nära detonerande sprängämne utan att skadas. När intresset för att studera reaktionsförloppet inne i sprängämnet började kräva metoder för mätning av detonationstrycket alldeles intill reaktionszonen måste nya givartyper utvecklas. Innan vi går in på dessa tar vi en kort titt på lite långsammare tryckförlopp.

På många materialforskningslaboratorier används högtryckspressar för att utsätta material för höga och mycket höga tryck. Man brukar sätta gränsen mellan höga och mycket höga tryck vid 2 GPa. Banbrytande arbete har inom dessa områden utförts av P.W. Bridgman vid Harvard-universitetet. Anledning till intresset för studier av ämnen under mycket höga tryck är de strukturförändringar som sker i materialet. Nya kristallformer bildas och det uppstår snabba fasskiftet varierande från ämne till ämne. En stor del av denna högtrycksforskning är idag inriktad på pulvermetallurgiska frågor. I pressarna är tryckkammarens volym från några hundra cm^3 för de lägre tryckområdena ner till någon tiotusendels mm^3 för de allra högsta trycken då diamantstäd användes. Kammaren innehåller vanligen en vätska eller ett ämne som vid tryck blir flytande och hydrostatiskt överför trycket till provobjektet.

Vid dessa arbeten kan man mäta trycket dels kontinuerligt med en givare och dels stegvis genom att observera olika materials omvandlingspunkter vid specificerade temperaturer. För kontinuerlig tryckmätning används vanligen givare i trådform tillverkade av legeringarna Manganin och Zeranin. Båda är uppfunna av Isabellenhütte i Tyskland. Manganin består av 85,9% (vikt) koppar, 9,5% mangan, 4,0% nickel, 0,5% järn och 0,1% kisel. Legeringen användes för tillverkning av tråd till precisionsmotstånd. Det var svensken Erik Lisell som 1903 föreslog att som tryckgivare utnyttja manganintrådens resistansökning vid tryck /3/. Givare av flera olika halvledande ämnen används även som tryckgivare i högtryckspressar.

Vid mätning av stötvågstryck inne i detonerande sprängämne har trådgivare av den ovannämnda legeringen Manganin använts av flera forskare. Bl a rapporterar Cudzilo et al. om mycket lyckade arbeten med en givartyp som hade tråddiameter 0,1 mm och initialresistans mellan 2 och 3 Ω /4/. Manganingivare utförda som tunna folier tillverkas kommersiellt och används speciellt inom den militära forskningen. Urtiev et al. /5/. Fabrikanterna säger sig kunna kalibrera foliegivarna med en tolerans på någon %. Folien är vanligen 25,4 μm tjock och försedd med ett 250 μm tjockt teflonskikt som skydd. Givarna finns i olika dimensioner med mätytor ner till 0,3 x 0,7 mm.

Vid mätningen används en pulsgenerator som kan ge en konstant ström upp till 50 A genom givaren under max 200 μs . Då givaren ändrar motstånd när den utsättes för tryck registreras detta som en spänningsändring på den utgående signalen. I en annan konfiguration, då mycket låg strömstyrka användes, kan foliegivare användas i en bryggkoppling liknande en Wheatstone-brygga för trådtöjningsgivare. Då kan även långvariga förlopp mätas. Givarna kostar över 1000:- per styck.

Betydligt billigare tryckgivare får man med kolmassamotstånd vilket är en typ av motstånd tidigare mycket använt i elektronikkonstruktioner. Dessa givare har fått stor praktisk användning inom den sprängtekniska forskningen. Tekniken grundar sig på iakttagelser gjorda på elektronikkomponenter placerade i instrument för djuphavsforskning. Kolmassamotstånd som utsattes för tryck minskade sin resistans men återgick till det normala värdet då trycket togs bort. Buchanan och Flato /6/.

Många forskare började experimentera med denna upptäckt för att få den praktiskt användbar som tryckgivare för sprängämnesforskning. Richard W. Watson vid Bureau of Mines i USA har bildat skola med sin uppfinning av en dynamisk tryckgivare användbar till tryck över 7 GPa /2/ och /7/. Han använder ett kolmassamotstånd med den nominella resistansen 470 Ω och effekttåligheten 1/8 W vilket ingjutes 1,3 mm under basytan på en polyetylencylinder med måtten ca 25 mm i diameter och höjd. Kolmassamotståndet är tillverkat av Allen-Bradley Co. i USA och 3,9 mm långt med 1,6 mm i diameter vilket ger en totalvolym av 7,8 mm³. I motståndets bägge ändar sitter anslutningstrådar av koppar med 0,4 mm diameter.

Anledningen till att kolmassamotståndet minskar resistansen vid tryck är dess uppbyggnad. Det består av en finmald blandning av kolpulver, vilket har relativt låg resistans

och keramik, som är helt oledande. Blandningen avvägs så att man efter tillsats av bindemedel och anslutningstrådar kan baka det hela i värme under högt tryck och få önskat motståndsvärde. Detta värde är även beroende av kontaktmotståndet mellan de finmalda partiklarna och tvingas dessa hårdare samman av ett utifrån kommande tryck så minskas resistansen i kolmassamotståndet.

Watsons tryckgivare användes för att mäta mycket höga dynamiska tryckpulser alldeles vid detonationsfronten och ibland införes en tunn metallplatta som stötvågsdämpare framför tryckgivaren. Givaren användes ofta för att få en god kvantitativ utvärdering av resultaten vid s k barriärprov. Då detonationsfronten eller reaktionsprodukterna når givaren förstörs den inom några nanosekunder och slutar fungera. Man kan alltså relativt lätt mäta tryckuppgång och troligt maximaltryck men får ingen information om trycksänkningsfasen.

Austing et al. mäter stöt- och detonationstryck med 5 givare placerade på mantel-ytan och en på basytan av ett sprängämnesfyllt rör. Man använder Watsons koncept med kolmassamotståndet ingjutet i en skyddande plastkuts och med ett ca 1 mm skikt som skydd mot detonationstrycket. Detta räcker för att skydda givaren så länge att man hinser få de mätvärden som söks innan den förintas av detonationen /8/.

Ginsberg och Asay använder kolmassamotstånd, endast skyddade med krympslang, som tryckmätare vid verkansprovning av RSV-laddningar skjutna in i rör fyllda med olika material /9/.

Under projektets gång har förf. vid flera tillfällen kunnat diskutera frågor rörande tryckmätning och signalkonditionering med Martin Streich och Ralf Zimmermann vid Bergbau- Versuchsstrecke i Dortmund-Derne. Där har man utvecklat en pålitlig metod för stöttrycksmätning liknande Watsons koncept men med kalibrering enligt Hollenbergs tryckmätningar på stötvågor i vätskor och fasta kroppar /10/. Laboratoriet använder givarförstärkare av egen konstruktion och egen programvara för mätvärdesutvärdering med korrektion för anomalier i givarkalibreringen. /11/. Se fig. 4. Numera ingår laboratoriet i Deutsche Montan Teknologi som är en stor sammanslutning av forskningsinstitut med arbetsområdena: råvaror, energi och miljö.

Scholz, som arbetade vid ovanstående provningsanstalt utvecklade 1979 en tryckgivare för mätning av spränggastryck från s k Wettersprengstoff, lågenergisprängämnen avsedda för användning i kolgruvor /12/. Han använde ett kolmassamotstånd placerat i en kammare med ca en cm^3 volym, fylld med Hexantriol och försedd med ett gummi-membran över öppningen. Denna är riktad mot en skyddshylsa försedd med några hål mot kammaren och 32 hål utåt för att kunna släppa in spränggastrycket men samtidigt skydda kammaren från att skadas av varma spränggaser och partiklar. Se fig. 5. Man har med dessa givare mätt trycktidförlopp upp till 0,25 GPa tryck under 5 msek.

Gert Bjarnholt vid SveDeFo (numera del av SveBeFo) utvecklade 1984 i ett samarbetsprojekt med Wilson och Holloway från University of Maryland en givare för mätning av spränggastrycket i toppen på sprängborrhål vid kontursprängning med mycket låg

specifik laddning /13/. Givaren bestod av ett kolmassamotstånd skyddat av epoxilim som göts i en kammare i en aluminiumcylinder. En 3 mm tjock aluminiumbricka fungerade som skydd och överförde tryckpulsen till den epoxifyllda kammaren. Se fig. 6. Aluminiumcylindern placerades som propp mellan laddning och förladdning i de 6 m långa borrhålen. Se fig. 7. Med dessa givare mätte man trycktidförlopp upp till 0,18 GPa under 6 msek.

Förf. har vid diskussioner med Bertil Sundqvist och Martin Forsgren vid Avdelningen för experimentell fysik vid Umeå Universitet fått ta del av den stora erfarenhet man där har av alstring och mätning av mycket höga tryck. Vi har även fått utföra statiska kalibreringar av kolmassamotstånd i Quintuspressen på deras högtryckslaboratorium. Se vidare kap. 3.8.1.

3.5 LHM-cellen

Den Lägesbestämda Hydrostatiska Mätkoppen är grunden till hela mätmetoden och vi skall se närmare på några detaljer och svårigheter. Hela anordningen försedd med tryckkännande sensor benämnes för enkelhets skull "LHM-cell".

3.5.1 Mätkoppen

Ett både hårt och segt material var önskvärt att välja till koppen då denna måste kunna expandera något i diameter för att mantelytan skall nå ut till borrhållsväggen när trycket ansattes mot koppens öppning. Vi planerade försök med en pressad hylsa av patronmässing men avstod på grund av kostnadsskäl. Lättmetall valdes också bort då materialet, i varje fall de billigare kvaliteterna, saknar den spänst som fordras för att säkert omsluta den i botten placerade bussningen. Flera olika material diskuterades, bland annat olika plaster med inbakad armering för stabilisering och förhöjd hållfasthet i vissa riktningar.

Vi valde ett konstruktionsstål SS 2172 med brottgräns $>490 \text{ N/mm}^2$, undre sträckgräns $>290 \text{ N/mm}^2$ och hårdhet 140-180 HB. Materialet är billigt och lättbearbetat och har vid trycksättning visat sig väl klara den plastiska deformation koppen utsättes för i borrhållsbotten. För att koppen vid applicering inte skall kila fast mot de ojämnheter som vanligtvis finns på borrhållsväggen måste ett spelrum finnas mellan kopp och vägg. Är berget helt och väggen mycket slät kan koppens diameter vara upp till 95% av borrhålets. Några % mindre koppdiameter har vi med gott resultat använt vid skjutningar i mer normala hål.

Koppens väggdjocklek bör enligt våra erfarenheter vara 10-15% av dess ytterdiameter. Se fig. 1. Koppväggen kan då lättare expandera ut mot hållväggen och minska spränggasens påverkan på koppens kabelgenomföring. Då en bussning för signalgenomföring skall monteras i botten måste denna göras relativt tjock, 30-50% av koppens diameter är lämpligt. Om botten göres för tunn kan genomföringshålet i basytan påverkas vid mantelytans expansion. Inne i koppen skall radien i mm vid övergången mellan väggen och botten helst vara lika stor som väggdjockleken. Proportionerna mellan innermåttens

diameter och höjd bör ej understiga 1:2 se även kap. 3.5.4. Koppens utvändiga bottenprofil rundas av till en radie som dels underlättar passagen ner genom hålet, dels i möjligaste mån anpassas till formen på hålbotten.

Skall mätkoppen användas kraftigt lutande, liggande eller upp och nedvänd måste den förses med ett lock. Detta tillverkas lämpligen av tunnt plexiglas så att man lätt kan kontrollera att koppen är tillräckligt fylld med vätska.

3.5.2 Tryckmediet

Valet av trycköverförande vätska, tryckmedia, har flera infallsvinklar. Vi vet att LHM-metoden kan komma till användning upp till tryck över 10 GPa och valet av tryckmedia bör vara anpassat till detta.

Vid högtryckslaboratorier världen över har man sedan 1930-talet studerat vätskors beteende vid höga tryck. De flesta vätskor har visat sig vara användbara upp till ca. 1,0 GPa men vid högre tryck uppstår två problem. Det ena är viskositetsökningen, d v s vätskan blir mer trögflytande vilket karakteriseras av att det under formförändring uppträder friktionskrafter som motverkar hastighetsskillnaden mellan närliggande skikt. Det andra är den s k solidifieringen d v s glasbildningen.

Om en vätska kyls eller komprimeras långsamt fås en ordnad fast form, en kristall, t.ex. is, men vid tillräckligt snabb kylning/komprimering kan vätskan istället bilda ett oordnat glas. Vid kristallisation ändras volymen kraftigt vilket kan leda till skador på givare etc. (jfr frysning av is i ledningar), men detta sker inte vid glasbildning.

De vätskor som användes i högtryckslaboratoriernas pressar för hydrostatisk överföring av tryck till provobjekt är vanligen blandningar av organiska lösningsmedel. En ofta använd blandning är pentan/isopentan (50/50 vol). Blandningens viskositetsökning är acceptabel vid höga tryck liksom glasbildningen. Men i LHM-cellen kan inte dessa vätskor användas då den skall användas i direkt kontakt med detonerande sprängämne. Detonationen skulle fortsätta in i pentan/isopentan-blandningen vilket ju inte är önskvärt. Det förhåller sig likadant med övriga brännbara tryckmedia.

Vatten användes i högtrycksammanhang huvudsakligen som studieobjekt då det har många intressanta egenskaper och omvandlingsfaser som kan studeras då man trycksätter det. Viskositetsökningen vid tryckhöjning är lägre än för övriga vätskor men tyvärr inträffar den tidigare nämnda glasbildningen relativt tidigt, vid ca 1,5 GPa vid rumstemperatur. Men då glasbildningen är en långsam process i sekundområdet och våra sprängförlopps högtrycksdel (>1,5 GPa) kan vara i några millisekunder, vågade vi ändå använda vatten som tryckmedia. Temperaturen i vatten ökar också mindre än i de flesta vätskor vid snabb (adiabatisk) kompression.

Liksom alla ämnen, komprimeras vatten vid tryck. Se fig. 8. Enligt vattens Hugoniot-ekvation blir vid hastiga förlopp kompressionen dock något mindre än vad grafen visar.

Värmestrålningen från det detonerande sprängämnet absorberas i vattnet innan den når tryckgivaren i botten på koppen. Vi har därför inte ansett det nödvändigt att färga vätskan med värmeabsorberande ämne. Men värmets alstras i vätskan vid komprimering finns naturligtvis där.

3.5.3 Luft i tryckmediet

Mediet, H_2O , innehåller normalt luft i varierande mängd från någon % volym eller mer. Luften kan drivas ut om mediet uppvärms eller bara får stå stilla. Den avgår då från vätskans yta men ansamlas även i bubblor på det inneslutande kärlets väggar. Luft kommer åter lätt in i vätskan då man hanterar denna vid skakning och hällning.

Luften i tryckmediet ger normalt inga bekymmer utom då LHM-cellen skall användas så kraftigt lutande att dess mynning måste täckas med ett membran. Göres membranet transparent kan man lätt se hur mycket luft som eventuellt frigöres ur vattnet. Om en kapsel med stor luftbubbla användes helt upp och nervänd kan luftbubblan störa tryckförloppet runt tryckgivaren då bubblan vid trycksättning totalt kolapsar och en rörelse därvid uppstår i mediet vilket kan skada givaren. Tillsatser av olika slag är naturligtvis möjligt att blanda i tryckmediet för att påverka det fysikaliska beteendet hos detta men vi har inte nämnvärt fördjupat oss i dessa frågor då LHM-metoden fungerar bra som den är.

3.5.4 Rörelser i tryckmediet

Då sprängämnet detonerar intill LHM-cellen kan detonationsfronten vara något sned beroende på att sprängladdningen inte ligger centrerad mot LHM-cellen eller att någon annan störning uppstår i detonationsförloppet. Tryckmediet reagerar då som om en kolv med sned kolvtopp pressat mot vätskan och en virvelrörelse uppstår inne i koppen. Denna effekt observerade vi under utprovningen av givarkonstruktioner i provkanonen, se vidare avsnitt 3.9.2. Till denna virvelrörelse adderas vid höga tryck naturligtvis även komprimeringen av tryckmediet.

3.5.5 Kabelgenomföring i mätkoppen

I LHM-cellen som är fylld med tryckmediet placeras en tryckgivare av lämpligt slag vars mätvärden skall registreras i en minnesenhet placerad utanför koppen. Signaler skall alltså föras ut genom botten på cellen via en kabelgenomföring. Denna genomföring skall dels säkerställa god galvanisk kontakt mellan tryckgivare och minnesenhet dels klara maximala trycket i cellen. Vid låga tryck $<0,1$ GPa kan en plast- eller lättmetallbussning ge tillräcklig tätning om diametern begränsas till några mm. Bussningsmaterialet extruderas emellertid mycket lätt, troligen beroende på den

inledande snabba trycktransienten som räcker till att starta förloppet. Vid högre tryck ökar arbetsinsatsen och kostnaden för att framställa trycktåliga kabelgenomföringar.

Vi använder en metod som förenklar arbetet något jämfört med många av de i litteraturen beskrivna konstruktionerna med flera lager av packningsmaterial och labyrinter. En konisk stålbuskning monteras med presspassning i LHM-cellens botten. Se fig. 1. I bussningen är en thermokoaxledare placerad. Denna består av en 2 mm tjock mantel av rostfritt stål innehållande magnesiumoxid som isolermaterial och två 0,35 mm tjocka koppartrådar som ledare. Koppartråden i thermokoaxen kallvalsas vid tillverkningen inbäddad i magnesiumoxiden och blir relativt hård med en ytstruktur som avbildar magnesiumoxidens korn. Se fig. 9. För att undvika avbrytning måste trådarna hanteras varsamt. Primärt var thermokoaxledarna avsedda till termoelement och kompensationsledningar. Numera har de fått användning inom många områden t ex som värmelement för specialändamål och för signalöverföring inom brandriskområdet. Metallen i ledarna anpassas naturligtvis till användningsområdet.

Det isolerande materialet, magnesiumoxid, blir vid tillverkningen mycket hårt komprimerat vilket ger thermokoaxen en hög trycktålighet. Tyvärr är magnesiumoxid mycket hygroskopiskt vilket ställer extra höga krav på stor försiktighet vid hantering och noggann förslutning av thermokoaxens ändar med fuktisolerande lack.

3.6 Bergmontage

LHM-metoden är primärt framtagen för att användas vid tryckmätning i sprängborrhål i berg. Appliceringen av LHM-cellen i botten på borrhålet innebär inte några större svårigheter men överföringen av mätsignalen till en registreringsutrustning kan ge vissa bekymmer. LHM-cellen kan placeras i mynningen både på vertikala och horisontella sprängborrhål men funktionstiden blir kort då cellen blåses ut och kablaget förstöres. För att i sådana hål få något så när lägesbestämning måste en förladdning av betong eller liknande gjutas i borrhålet bakom cellen. Men sådana sprängborrhål, med gjuten förladdning, är inte verklighetstroga varför intresset för dem är litet. En kraftig förladdning av hårt sammanpressat borrhålskav kan troligen användas om utgående kablarna motstår den sättningrörelse som uppstår.

3.6.1 Borring

Det ”enklaste” bergmontaget av LHM-cellen göres med genomgående hål där den del som utgör sprängborrhål har en för sprängningen lämplig dimension och resterande del borrar med betydligt mindre diameter men tillräcklig för att föra ut kablaget från LHM-cellen. Se fig. 10. Det genomgående hålet kan ha en godtycklig riktning. Vi har konstruerat en specialborr för genomgående hål där det grövre hålet avslutas med ett klenst hål för kabelgenomföring. Se fig. 11. Vi borrar först, med en vanlig borrhålskrona den del av hålet som skall bli sprängborrhål. Sedan byter vi till det övre borrhålsstålet i figuren och borrar med denna centrerade klenborr ett 100 mm djupt hål i sprängborrhålets botten.

Det till 19 mm diam nerslipade borrarstålet, det nedre i figuren, användes sedan för att göra ett genomgående hål upp till 600 mm långt.

En svårare borrarning måste t ex göras vid tryckmätning under pallsprängning, se fig. 12. Man går då in genom pallens frontyta med en så smal borr som möjligt och borrar snett upp mot sprängborrhålets botten. Denna borrar metod fordrar både stor skicklighet och ett visst mått av tur för att hålet skall hamna rätt.

3.6.2 Håltätning

Vid de ovan beskrivna borrarningarna måste, om kraftig sprängladdning användes, en noggrann tätning göras i kablagehålet ända från LHM-cellen. Alldeles under cellen, omkring kabelgenomföringen, kan t ex en några mm tjock aluminium- eller blypackning placeras som hjälper till med tätningen mot kablagehålet i berget. Kablarna måste skyddas i pansarrör eller liknande för att motstå det läckage av spränggas som kan uppstå i springan mellan borrhållsvägg och LHM-cell. Kablagehålet fylles genom injektering med t ex GF-cement Densit eller tvåkomponents härdplast eller liknande material med lämpligt avpassad bindetid.

3.7 Givare

LHM-metoden fordrar naturligtvis att en givare skall placeras nära botten i LHM-cellen. Valet av givartyp är beroende av vilka krav man ställer på mätsystemet t ex i fråga om tryckområde, mättid och kostnad.

3.7.1 Givartyper

- Turmalingivare kan användas upp till ca 0,1 GPa tryck, d v s i samband med svaga laddningar vid t ex skonsam sprängning.
- Kvartskristallgivare, t ex Kistlers högtrycksgivare kan mäta upp till 1,0 GPa men då den kostar över 30 000 :- och det ofta finns risk för skador vid mätningar på detonationsförlopp bör man nog välja en billigare givare.
- PVDF-givare tillverkas av polyvinylidenfluorid som ges piezoelektriska egenskaper. Det innebär att materialet kan omvandla mekanisk energi till elektrisk och omvänt. Givaren har tyvärr även hög känslighet för värme men användes ändå på många laboratorier för mätning av tryck upp till 1,0 GPa. PVDF-givare måste monteras på ett städ vid LHM-användning.

De tre ovan nämnda givarna kan p g a att de arbetar med den piezoelektriska principen inte användas för långsamma förlopp, t ex i sekundområdet, då deras tidskonstant är för kort.

- Trådtöjningsgivare kan naturligtvis också användas för tryckmätning med LHM-metoden om de monteras på ett städ.
- Manganinfoliegivare, se sid. 5, skall också monteras på ett städ vid användning i mätkoppen.
- Optiska givare har vi sökt efter bl a med hjälp av Institutet för Optisk Forskning vid KTH. Någon för våra applikationer användbar optisk trycksensor finns ännu ej på mätinstrumentmarknaden.
- Kolmassamotståndet, se sid. 5, är en väl etablerad givare för mätning av detonationstryck och stötvågor i olika sammanhang. Då priset dessutom är mycket tilltalande valde vi att använda det som tryckgivare vid våra otaliga experiment med LHM-metoden.

3.7.2 Kolmassamotståndet

Vi har redan i kap. 3.4 i korthet beskrivit den aktuella motståndstypen med 1/8 W effekttålighet, 470 Ω nominellt värde och med $\pm 5\%$ tolerans. Motståndet är 3,9 mm långt med 1,6 mm diameter. Den aktiva motståndskroppen är 1,0 mm i diameter och den är försedd med ett 0,3 mm tjockt skyddsskikt av keramisk massa vilket även innehåller den färgmarkering som anger motståndets data. Detta skikt bildar även en värmeisolering vilket är bra då motståndstypen är temperaturberoende. Enligt tillverkaren, Allen-Bradley, ökar resistansen med 2000 ppm per $^{\circ}\text{C}$. Egenkapacitansen är relativt hög, ca 0,3 pF och beror på uppbyggnaden med kol- och keramikpartiklar sammanhållna av bindemedel. Egeninduktansen är dock låg vilket gör motståndstypen lämplig att använda i pulstillämpningar vilket passar vår användning. Det är tryckkänsligheten som gör motståndet intressant som givare i LHM-cellen. Resistansen minskar vid tryckpåläggning.

3.7.3 Tryckgivarförstärkare och mätvärdesregistrering

Konstruktionens uppgift är att känna av de resistansförändringar som uppstår i givarmotståndet (kolmassamotståndet) då detta utsättes för tryck. Denna förändring omvandlas till en utsignal med en spänning proportionell mot det pålagda trycket.

Förstärkaren består av en konstantströmgenerator vilken matar givarmotståndet, se fig. 13. Som strömgenerator användes kretsen IC1, LM334 vilken med motståndet R1 på 68 Ω styres så att den lämnar en konstant ström på 1 mA genom givarmotståndet. Detta har ju den nominella resistansen 470 Ω vilket medför att spänningen över motståndet är 470 mV i viloläge. När motståndet utsätts för tryck sjunker resistansen och därmed även spänningen över motståndet.

Spänningen över givarmotståndet påföres en snabb operationsförstärkare som är kopplad som icke-inverterande. Förstärkningen kan varieras mellan 1,5 och 2,5 gånger med potentiometern RV 1. Utgångskretsen har impedansen 50Ω och är ansluten till en BNC-kontakt.

Eftersom man vill mäta tryckvariationer vid detonationen och hålexpansionen skall spänningen i viloläge balanseras bort. Detta sker med ytterligare en strömgenerator av liknande typ IC3, LM337L. Denna är styrd att lämna en något högre ström än 1mA. Strömmen går genom motståndet R8 och potentiometern RV2 som justeras så att skillnaden i potential på förstärkarens båda ingångar, stift 2 och 3, blir 0 V. Denna kretslösning har valts för att minimera temperaturdrift då de båda strömgeneratorerna varierar lika mycket när de utsättes för samma temperatur.

Elektrolytkondensatorn C1 skapar en jordpunkt för växelström i anslutningen mellan R2 och R8. Därmed kommer förstärkningen att bestämmas av förhållandet mellan R2 och kombinationen R3-RV1 enligt formeln:

$$\text{Förstärkning} = (R2+R3+RV1)/R2$$

Vi har valt operationsförstärkaren AD 847 från Analog Devices Co. p g a dess snabbhet, 300 V/ μ sek. Hela konstruktionen strömförsörjes med två 9 V standardsbatterier och är inbyggd i en skärmlåda av lättmetall, se fig. 14. Känsligheten för påverkan av elektriska störfält kan minskas om sensoringången utföres balanserad vilket emellertid fördyrar konstruktionen. Den erhållna utsignalen har 50Ω impedans och kan utan förvrängning överföras via koaxialkabel till registreringsutrustning på flera hundra meters avstånd. Tryckgivarförstärkaren utvecklades i samarbete med Lars Stenling på Swedish Technology AB.

En äldre delvis defekt 20 MS/s transientrecorder av fabrikat Data Lab användes för mätvärdesregistrering under huvuddelen av utvecklingsarbetet. Den tillät inte avtappning av data eller överföring till dator. Förloppet kunde endast studeras på en oscilloskopskärm där efter avfotografering tider och spänningar uppmättes med en cursor. Exempel på registrering i fig. 15. Vid de avslutande mätningarna användes en Le Croy transientrecorder vilket avsevärt underlättade utvärderingsarbetet. Se exempel i fig. 16. Transientrecordern kan beroende av mätobjekt och mätplatsförhållanden startas genom inre eller yttre trigging.

3.7.4 Elektromagnetisk puls

Då sprängämne detonerar alstras i olika hög grad, beroende av sprängämnestyp, en elektromagnetisk puls, EMP, i detonationszonen. Orsaken är att spränggasen upphettas så mycket att atomerna eller molekylerna förlorar elektroner och blir joner. Denna gas är nästan alltid joniserad och blir en mycket god elektrisk ledare då flertalet atomer

bildar positiva joner och fria elektroner. EMP sänds ut från plasman då den bildas och då den försvinner samt då den rör sig i det jordmagnetiska fältet.

LHM-cellen ger genom sin konstruktion ett relativt gott skydd mot EMP. Vid skjutning av enstaka hål med tryckmätning är EMP försvunnen då spränggastrycket börjar påverka tryckgivaren. EMP från laddningar i närbelägna hål kan emellertid nå fram till sensorn eller dess kablage. Sådana elektromagnetiska störningar undvikas genom god jordning av skärmen för sensorns kabelgenomföringar och utgående kablage. Eventuellt kan ett tunt metallmembran behövas som ytterligare skärmning framför LHM-cellens mynning.

3.8 Givarkalibrering

Vi har valt att använda kolmassamotstånd som tryckgivare i LHM-cellen bl a därför att de länge har varit mycket populära inom sprängämnesforskningen. I våra applikationer där mätning av hela trycktidförloppet i sprängborrhål utgör huvudintresset är det naturligt att de presumtiva användarna av mätmetoden ställer frågan om det tryckvärde vi anger verkligen är sant. Kravet finns att vi skall kunna ange absolutvärde med acceptabel onoggrannhet men hur stor har aldrig specificerats. Filosofin under arbetet med LHM-cellen har varit:

1. Skapa en anordning som skyddar givaren så att hela trycktidförloppet kan följas under detonationen i ett fulladdat sprängborrhål.
2. Skapa ett så stabilt system att mätningen kan repeteras med några procents onoggrannhet.
3. Kunna ange absoluta tryckvärden med utgångspunkt från våra egna och andra sprängtekniska laboratoriers kalibreringsarbeten.

Sista punkten är ganska diskutabel med tanke på att LHM-cellen skyddar givare vid de högsta tryck som kan åstadkommas i botten på fulladdade sprängborrhål, kanske över 10 GPa. I dessa höga tryckområden skiljer resultaten mycket mellan olika forskares kalibreringar. Vi belastar kolmassamotståndet hydrostatiskt medan man ofta vid andra mätmetoder i princip belastar det mellan ett städ och en hammare, vilket också bör ge skillnad i resultat. För de lägre trycken under 1.0 GPa är kalibreringen lite lättare att få grepp på. Som en jämförelse kan nämnas att vid de högtryckslaboratorier där man alstrar höga statiska tryck i pressar kan onoggrannheten för tryck under ca 2,5 GPa vara $\pm 1\%$. Men i de högre områdena 5-10 GPa har man svårighet att nå onoggrannhet under $\pm 10\%$ om inte exceptionellt dyrbar skrubinkalibrering användes då man når $\pm 3\%$. Tryckkammarens volym är då ofta mindre än en tiotusendels mm^3 !! och kräver diamantcell så att det finns fönster för den optiska tryckmätningen.

3.8.1 Vår kalibrering

Vi utförde statiska kalibreringar av 2 stycken 470 Ω kolmassamotståndsgivare vid 'Avdelningen för Fysik' vid Umeå Universitet. Där användes en Quintuspress som ursprungligen utvecklades av Baltzar von Platen för diamanttillverkning, se fig. 17. Motståndet placerades i en tryckcell tillsammans med tryck- och temperaturgivare och pentan/isopentan, 50/50 vol., användes som tryckmedium. Manganintrådsgivare med noggrannheten $\pm 1\%$ användes som trycksensor vid kalibreringen.

Motståndet behandlas enligt följande: Först en cykel upp till 1,0 GPa sedan ner till ca 0,1 GPa, därefter en ny cykel till 1,5 GPa och tillbaka och slutligen en cykel där vi siktede på 2,5 GPa och kom till ca. 2,1 GPa innan trådarna började gå av så att vi tappade både temperatur- och tryckmätning. Denna cykling kan i efterhand anses vara diskutabel då den knappast kan förekomma i verkliga sprängborrhål. Vi har endast använt den första cykeln från 0-1,0 GPa för vår kalibrering av kolmassamotståndet som tryckgivare. Men då det även är intressant att studera motståndets hysteres vid tryckminskningen visar vi hela cykeln i fig. 18. Hysteresen kan naturligtvis läggas in i utvärderingsprogrammet så att en hystereskompensering göres då en viss trycknivå har uppnåtts. Men detta har vi ännu inte gjort. Hålltiden för varje mätning är 10 minuter.

Kurvan "Run 2" i fig. 19 tar vid där ettan slutar och visar resultaten från andra cykeln. Man ser att hysteresen minskar ordentligt och blir mycket liten över 1,2 GPa. "Run 3" i fig. 20 visar resultaten från sista cykeln där vi tyvärr bara fått resultat för ökande tryck och endast en punkt vid ca. 0.65 GPa för minskande tryck och några punkter vid nolltryck. I figur 21 visar vi resultaten för ett av motstånden från alla cykler. Lagg märke till att resultaten från olika cykler nästan överlappar varandra både vid ökande och minskande tryck. För varje cykel minskar R vid minimitryck (0,1 GPa) men över 1,0 GPa fås praktiskt taget exakt samma resultat i alla cykler och hysteresen blir försumbar jämfört med motståndets tolerans. I detta område blir också tryckkoefficienten mycket lägre och nästan konstant.

På figuren med de tre körningarna kombinerade har vid 0-tryck på resistansaxeln markerats motståndsvärdet uppmätt över tre dygn efter trycksättningen. Motståndet kryper sakta uppåt och är efter tre dygn högre än begynnelsevärdet. Det betyder alltså att man inte har någon särskilt stor nytta av en sådan tryckbehandling då motståndet efter en tid mer eller mindre återgår till sitt ursprungsvärde.

Professor Bertil Sundqvist vid Umeå Universitet har studerat resultaten från tryckkalibreringarnas olika cykler och beräknat kurvans lutning vid 2,0 GPa ur en polynom-anpassning och funnit tryckkoefficienten $(1/R(\text{vid } 2 \text{ GPa}))(dR/dp)$ vara $-29,3\%/GPa$. Detta är klart jämförbart med motsvarande koefficient för c-axel-resistansen i ren grafit, som är -26 till $-27\%/GPa$. Han drar slutsatserna att man troligen har komprimerat bort alla eventuella hålrum i motståndet vid 2,0 GPa och att man däröver med god noggrannhet kan använda resultaten för ren grafit för att extrapolera resultaten till mycket höga tryck.

Resultatet från den första cykeln 0-1,0 GPa har vi använt för att beräkna trycket vid användning av kolmassamotståndet vid LHM-mätningar, se fig. 22, där vi extrapolerat kurvan till 7 GPa. För att få kurvans ”sanna värden” över 2,1 GPa måste naturligtvis kalibrering göras mot väl dokumenterad tryckgivare. Se t ex kap. 3.8.3. Den relativa konduktansförändringen ($\Delta G/G_0$) avsatt mot trycket visas i fig. 23.

3.8.2 Andra forskares kalibreringar

Richard W Watson kalibrerade 1967 sin variant av 470 Ω kolmassamotståndsgivaren genom att utsätta den för stötvågstryck från väl kända sprängämnen [7]. Vid skjutningar med sk barriärprov placerade han stötvågsdämpande material framför tryckgivaren och fick då ett antal punkter som han sammanband till den tryck/motståndskurva som visas i fig. 24. Han rapporterade ursprungligen tryckvärden från 1,19 GPa till 7,0 GPa men kompletterade den senare att gälla även för lägre tryck.

Många sprängämnesforskare har under årens lopp gjort egna kalibreringar av 470 Ω kolmassamotståndet och då även i det lägre tryckområdet. Vi har gjort en sammanställning som endast visar en liten del av befintliga arbeten inom området och visar den i fig. 25. Diskrepansen är stor mellan vår statistiska kalibrering vid rumstemperatur med hålltiden 10 minuter för varje tryckvärde och dynamisk kalibrering med snabb trycksättning och eventuell temperaturhöjning vid detonationsförlopp som här representeras av Watsons kalibrering. Fortsatt forskning är naturligtvis nödvändig för att finna den ”sanna” kurvan.

En hypotes att spridningen mellan de olika forskarnas kalibreringsresultat skulle bero på variationer i tillverkningen av kolmassamotståndet avfärdas av tillverkaren, Allen-Bradley. Motståndet tillverkades vid en fabrik i El Paso med mycket höga krav på kontroll av recept, ingående råvaror och tillverkningsmetod och ändrades inte mellan åren 1966 och 1996.

3.8.3 Manganinkalibrering

Inom Försvarets Forskningsanstalt, FOA, utvecklar man teknik för att använda tryckgivare av manganinfolie i olika applikationer inom den militära sprängteknikforskningen. Foliegivarna, som är i prisklassen 1000 kr/st, levereras från fabrikanten som uppger dem vara noggrannt kalibrerade för mätning av stötvågstryck. FOA har visat ett visst intresse att få prova vår LHM-cell och vid några sådana skjutningar skulle det naturligtvis vara värdefullt att i samma tryckkopp kunna parallellmäta med kolmassamotståndsgivare och manganinfoliegivare. Sådana jämförande mätningar borde ge oss möjlighet att ytterligare höja noggrannheten på våra absoluttryckmätningar.

3.9 Kanonprov

För att utveckla och finputs de detaljer som ingår i LHM-cellens givardel utfördes pilotförsök i laboratorieskala hos Atlas Copco i deras provgruva och på FOA's försöksstation vid Grindsjön. Det är svårt att i laboratorieskala efterlikna trycktidförloppet i botten på ett fulladdat sprängborrhål p g a den stora energimängd som frigöres. Därför var en kraftig nedskalning nödvändig och trycktidförloppet förkortades till ett par hundra mikrosekunder med laddningsstorlekar på några hundra kJ. De flesta laborieförsöken gjordes i kanonliknande konstruktioner byggda av kraftiga stålrör.

3.9.1 Kanonen

Den kanonmodell som vi huvudsakligen arbetade med visas i genomskärning i fig. 26 och de olika detaljerna visas isärlagda i fig. 27. Röret är 530 mm långt med 20 mm vägg tjocklek och en innerdiameter på 76 mm. Det avslutas i nedre änden med en platta som sticker upp 30 mm i röret och har ett genomgående hål för kablage. Ovanpå denna platta inuti kanonröret placeras en cylinder med något mindre ytterdiameter än kanonröret och med en urborring med 30 mm diameter. Denna kraftiga cylinder fungerar som återanvändbar LHM-cell då den inte deformeras vid skjutningen. I botten på denna kopp är ett koniskt hål där tryckgivaren monteras. I kanonens mynning sätts en 4 kg tung projektil som sticker in 50 mm i röret och har ett smalt hål för tändkabel.

Kanonen är lätt att montera isär för utbyte av olika detaljer men tillåter ändå trycksättning över 500 MPa under ett par hundra mikrosekunder. Den är så konstruerad att det endast är projektilen som kan röra sig då kanonen trycksätts. Tryckförlusten vid LHM-cellens mynning blir liten då labyrinten som bildas av väggar och kanonrörets nedre del utgör en relativt effektiv tätning. Ovanför LHM-cellen blir volymen inne i kammaren 1497 cm^3 . LHM-cellen fylls med tryckmediet som är vatten och laddningen hängs upp i det luftfyllda utrymmet mellan kopp och projektil. Vid skjutningen trycksätts kanonen och den 4 kg tunga projektilen flyger iväg och trycket minskar.

3.9.2 Givarkonstruktioner

I kanonen provades de detaljer som ingår i arrangerandet av kolmassamotståndet som tryckgivare i LHM-cellen. Flera olika kabelgenomföringar undersöktes då vi ville ha en funktionssäker men samtidigt billig konstruktion. Det krävdes mycket arbete och många kanonskjutningar innan vi löste problemet med att eliminera skador på tryckgivaren orsakade av de virvlar som ibland bildas i tryckmediet, se kap. 3.5.4. Kraven på mycket god elektrisk isolering av tryckgivarsystemet kunde också till slut uppfyllas och vi arbetar nu med isolationsmotstånd över 40 MΩ. Funktionssäkerheten för givarkonstruktionen låg länge mellan 5 och 10% men har successivt kunnat höjas och är nu nästan 100%. Signalöverföring och signalkonditionering med den nyutvecklade tryckgivar-

förstärkaren utprovades även vid kanonskjutningar.

Den slutgiltiga tryckgivarkonstruktionen visas i fig. 28. Kolmassamotståndet monteras vågrätt nära botten i mätkoppen och anslutes till genomföringens ledare. Anslutningen mellan koppartrådarna bör helst göras med punktsvetsning då tennlödningar kan påverkas av de mycket höga tryck mätkoppen utsätts för. Skarvarna omslutes av en skyddande homogen klots som endast frilägger kolmassamotståndet några millimeter ovanför sin kilformade överdel. Klotsen bakas av en tvåkomponents hårdplast bestående av dimetylaminometyl och polymerkaptanharts med kristallin kiselsyra som fyllningsmedel. Klotsen får inte innehålla några håligheter som kan göra att konstruktionen kollapsar då den utsätts för höga tryck. Kolmassamotståndet och dess anslutningstrådar förses med krympslang av Polyoenfin, en polyetentyp och får då ett 220 µm tjockt skyddsskikt.

3.9.3 Impulsjämförelse

Ett exempel på trycktidmätning från sprängning i kanon med projektilutkastning visas i fig. 29. Vi sköt bl a en serie på 3 skott med laddning bestående av 25 g sprängdeg som initierades med VA8-sprängkapsel. Detonationsförloppet i vår konfiguration blir inte likartat från skott till skott. Laddningsvikten är visserligen densamma och likaså formen på laddningen men initieringspunkten varierar något beroende på sprängkapselns läge i laddningen. Detta gör att trycktidförloppet varierar något mellan skotten men den frigjorda energimängden bör vara densamma. Testresultatet visar att spridningen är $\pm 3.5\%$.

Datum	Varaktighet	Botten-reflektion	1:a topp reflektion	Tryck före botten-reflektion	Tryck efter botten-reflektion	Impulstäthet
	(µs)	(µs)	(µs)	(GPa)	(GPa)	(Pa * s)
961016	121	16	980	0.18	0.36	16455
961025	135	15	795	0.26	0.42	17071
961025	145	14	803	0.13	0.33	17676

Fig.29 Testresultat från skjutningar med 25 g sprängdeg i provkanon.

3.9.4 DYNA2D - beräkningar

Junhua Deng på SveBeFo gjorde under projektets gång flera intressanta jämförande DYNA2D - beräkningar varav två exempel skall ges. Fig. 30 visar hur en LHM-kopp tänkes expandera vid trycksättning. Fig. 31 är en verklig LHM-kopp efter skjutning. I fig. 32 visas det dynamiska trycktidförloppet beräknat för trycksensoren i LHM-koppen. Fig. 33 är en verklig trycktidmätning.

3.10 Pallprov med LHM-cellen

LHM-cellens skyddande förmåga har under projektets gång provats i verkliga pallsprängningar. Några ”riktiga” mätningar av trycktidförloppet har ännu inte gjorts men de trycksensorer som varit monterade i kopporna har resistansprovats före och efter sprängningarna för att utröna om de klarat påfrestningarna i sprängborrhålet.

3.10.1 Normalhål

Proven med LHM-celler utfördes vanligen vid pallsprängningar med stående borrhål och skjutning mot en fri yta. För att efter sprängningen lättare återfinna kopporna i sprängborrhålets botten begränsades pallhöjden till 2-3 m. Håldiametern var vanligen 3” (76 mm) och försättningen relativt liten, 1,5-2 m, för att berget skulle kastas fram så mycket att återfinnandet av cellen underlättades. Sprängämnet placerades någon cm ovanför cellens mynning och bestod i de exempel vi här visar av Dynamex 60 x 560 mm.

Tryckgivaren som utgjordes av det tidigare nämnda kolmassamotståndet var monterat på en sexkantbult i vars huvud en mindre skruv var fastdragen för att utgöra fästpunkt och jordningspunkt för motståndets ena part. Den andra fria parten fördes ut genom väggen på den klots av hårdplast som skyddar kolmassamotståndets ledare. Resistansmätning kan alltså lätt göras mellan den utstickande ledaren och sexkantbultens massa. I cellens botten drog vi sedan fast bulten med en förlängd hylsnyckel.

Efter sprängningen måste cellen friläggas då den alltid täcks av nedrasade sprängmassor. Cellens diameter är normalt <95% av borrhålets vilket gör att den vätskefyllda delen expanderas till borrhålets diameter medan cellens homogena bottendel behåller sitt ursprungliga mått. Se fig 34 och 35. Tryckgivarna skruvades ur cellen och deras resistans kontrollerades varvid konstaterades att de alltid var oskadda. Se fig. 36.

3.10.2 Ej lägesbestämd

Om sprängborrhålets botten inte är stabil utan består av krossat berg kan mothållet i bergväggen runt LHM-cellen bli så dåligt att resultatet efter sprängning blir som fig. 37 visar, cellen splittras och tryckgivaren förstörs. Cellen sprängs *inte* då berget har den vanliga sprickbildning som normalt uppstår efter skjutningar av intilliggande borrhålsrader vid ex pallsprängning.

Känner man på förhand till att hålbotten är mycket dålig kan man, i varje fall teoretiskt, tänka sig att använda en cell med mycket kraftig vägg. En sådan borde kunna konstrueras för att tåla tryck upp till ett par GPa.

3.10.3 Flyttblock

Följande exempel ges för att visa att det finns undantag från regeln om lägesbestämd placering av den hydrostatiska mätkoppen.

I ett rullstensblock av granit med ca. 30 m³ volym och utan synliga yttre skador borrades ett 3" (76 mm) hål in till mitten av blocket. En LHM-cell placerades i hålets botten med en 60 x 560 mm Dynamex-laddning ovanpå och stenkross fylldes på som förladdning. Se fig. 38.

Efter sprängningen var rullstensblocket sönderdelat i lättlastade stenblock se fig. 39. LHM-cellen, se fig. 40, hade tydligen haft tillräckligt mothåll i hålväggen under den högsta tryckfasen av sprängningsförloppet då cellen hade expanderat mot väggen. Men sedan hade mothållet släppt då hela blocket börjat sönderdelas och tryckmediet kunde då pressas ut genom en spricka i cellens vägg. Kraften i den utrusande vätskeströmmen måste varit enorm men ändå hade tryckgivaren, kolmassamotståndet klarat sig och var helt oskadat.

3.11 Fältmätning

Två mätningar redovisas från försök i berg med komplett utrustade LHM-celler inkopplade till registreringsutrustning.

3.11.1 Granitblock i Atlas Copcos provgruva

Det första försöket i "berg" med en komplett utrustad och till registreringsutrustning kopplad LHM-cell gjordes i Atlas Copcos provgruva.

I ett granitblock 1 m högt, 1 m brett och 0,6 m tjockt borrades två genomgående borrhål med 0,3 m försättning. Hålen var borrade med den i kapitel 3.6.1 beskrivna specialborren. Den övre delen av de 1 m långa hålen hade diametern 40 mm med 600 mm längd och den nedre 400 mm långa delen var 19 mm i diameter. Fig. 41.

En LHM-cell placerades i botten av den grova håldelen och kablaget fördes ut genom den nedre smala delen. En enkel blypackning placerades vid LHM-cellens botten omkring kablaget vilket även skyddades av ett flexibelt pansarrör. Dessa minimala skyddsåtgärder beräknades vara tillräckliga för det relativt låga spränggastryck som förväntades uppstå. Laddning utgjordes av 45g Gurit i 17 mm rör placerat direkt ovanför LHM-cellen.

En Le Croy transientrecorder användes för mätvärdesregistrering. Tyvärr triggades apparaten för tidigt av fel signal varför vi inte lyckades registrera trycktidsförloppet. Sprängningsresultatet blev dock lyckat men en stor del av berget omkring det andra

borrhålet sköts också bort. Fig. 42. Då allt för lite försättning återstod kunde detta hål ej skjutas.

LHM-cellen var helt oskadad men pansarröret hade blivit klämt av nedrasade stenar. Fig 43. Efter justering av kablage och kabelskydd kunde denna LHM-cell användas på nytt i ett följande fältförsök.

3.11.2 Fältblock

En provserie om sju granitblock med LHM-celler i sprängborrhålen har skjutits av Shulin Nie i Svenneby stenbrott. Ett av dessa fältblocksförsök redovisas här.

Figur 44 visar blockets dimensioner och det genomgående borrhålet med 38 mm diameter för den övre spränghålsdelen och 19 mm diameter för den nedre kabelhålsdelen. LHM-cellen och sprängämnets placering visas i figur 45. Laddningen utgjordes av Nitro Nobels s.k. blå-rör med dimensionen 17x500 mm och vikten 115g. Toppinitiering användes och jonisationskontakter användes för trigging av registreringsutrustningen som bestod av Le Croy 9354 A transientrecorder. Blocket visas före och efter skjutning på bilderna 46 och 47. Trycktidregistreringen visas i fig. 48. LHM-cellen var helt oskadad efter skjutningen. Denna mätning och de sex övriga från Svenneby avrapporteras av Shulin Nie i SveBeFo-rapport nr. 42. /14/

4. SLUTSATSER

En helt unik metod, LHM, Lägesbestämd Hydrostatisk Mätkopp, har uppfunnits och utvecklats till ett intressant verktyg som skyddar tryckgivare vid t ex mätning av hela trycktidförlopp i botten på sprängborrhål. Appliceringen av LHM-cellen på mätplatsen är relativt enkel men arrangemangen med att föra ut mätsignalen till registrerande apparatur är besvärligare och kräver ofta ett stort mått av kreativitet. Då de erhållna trycktidförloppmätningarna inte tidigare kunnat göras med någon annan känd metod är arbetsinsatsen ändock försvarbar. En möjlig vidareutveckling, LHM 2 har minnesenheten inbyggd i LHM-cellen och förenklar därmed mätarbetet väsentligt. Se kap 5.

Vid våra mätningar av trycktidförlopp i sprängborrhål med LHM-cellen använder vi ett 470Ω kolmassamotstånd som tryckgivare. Andra givartyper kan också användas förutsatt att dessa är helt homogena och tål det aktuella trycket. Givarkalibreringen grundar vi på egna statiska kalibreringar upp till 2.1 GPa. Vi kompletterar kalibreringskurvan upp till 7,0 GPa med R. Watsons stötvågsmätningar men anser att dessa mycket höga tryck måste ytterligare kontrolleras. LHM-metoden ger ett mycket säkert skydd för tryckgivaren och om mätkoppens konfiguration hålles konstant uppnås en mycket hög reproducerbarhet vid tryckmätningen.

5. LHM 2

Den i rapporten beskrivna LHM-metoden kräver vid bergmontage ett omfattande arbete med speciell borrar, krävande håltätning och omfattande skyddsarrangemang för genomföring av signalkabeln. Allt detta för att kunna föra mätsignalen från tryckgivaren inne i mätkoppen ut till registreringsutrustningen.

I LHM 2 som föreslås bli en vidareutveckling av LHM-metoden byggs registreringsutrustningen in i LHM-cellen. Konceptstudie har gjorts tillsammans med Bofors Missiles Microelectronics, ett svenskt företag med militär mikroelektronik som specialitet. Konstruktionen anses vara realiserbar inom den ekonomiska ram som den civila sprängteknikbranschen kan acceptera. Kostnaderna hålls nere genom att använda erfarenhet och detaljer från befintliga s k "färdskrivare" vilka används för registrering av data vid provskjutning med militära robotar och kanonprojektiler.

LHM-cellens massiva botten förlängs något och borrar ur så att ett litet cylindriskt utrymme skapas som rymmer förstärkare, minnesenhet och kontaktdon. Se fig. 49. LHM 2-cellen placeras i sprängborrhålets botten och mäter trycktidförloppet. Hålbottnarna både från vertikala och horisontella hål finns normalt kvar efter en sprängsalva. Efter utlastning av t ex pallsalvan plockas LHM-cellen ur borrhålsbotten varefter den öppnas och mätningresultatet överföres till en dator för vidare utvärdering. Konstruktionen befinner sig på CAD-stadiet men kan om intresse finns vidareutvecklas till färdig produkt.

6. ERKÄNNANDEN

Många personer och företag har varit involverade i olika delproblem under LHM-projektets gång. Förutom till de i rapporten omnämnda framföres även ett stort tack till Atlas Copco AB och Skanska som ställt upp med personal och provplatser för fältförsök. Ett speciellt tack till Evert Carlson, Rosenhill, för omfattande hjälp med tätnings- och fogningsfrågor och till Shulin Nie, SveBeFo för hjälp med några kanonförsök, blockförsök, analys av försök och kalibreringsinformation samt tekniska figurer. Även tack till Junhua Deng, SveBeFo, för intressanta jämförande DYNA2D-beräkningar under utvecklingsarbetet samt Monica Carlsson och Eva Friedman, SveBeFo, för hjälp med rapportutskriften.

7. REFERENSER

1. Olsson, Mats och Bergqvist, Ingvar. "Sprickutbredning vid flerhållsprängning". SveBeFo Rapport 32, 1997.
2. Watson, Richard W. "*Dynamic Pressure Gage*". United States Patent Office nr 3341797, 1967.
3. Lisell, Erik. "Om tryckets inflytande på det elektriska ledningsmotståndet hos metaller samt en ny metod att mäta höga tryck". Akademisk afh. Uppsala, 1902.
4. Cudzilo, S et al. "*Measurement of Detonation Pressure by Means of Manganin Transducers*". J. Tech. Phys., 32, 3-4, pp. 467-477. Warszawa, 1991.
5. Urtiew, Paul. Forskare vid Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, Livermore, USA och rådgivare åt Dynasen, Inc, USA
6. Buchanan, C.L. och Flato, M. "*Putting Pressure on Electronic Circuit Components*". ISA Journal, v.8, Nov., sid 38 - 42, 1961.
7. Watson, Richard W. "*Gauge for Determing Shock Pressures*". The Review of Scientific Instruments, sid 978 - 980, volym 38, July 1967.
8. Austing, James L et al. "*Carbon Resistor Gauges for Measuring Shock and Detonation Pressures*". Propellants, Explosives, Pyrotechnics, vol. 16, sid 205 - 215, 1991.
9. Ginsberg, Michael J. och Asay, Blaine W. "*Commercial carbon composition resistors as dynamic stress gauges in difficult enviroments*". Rev. Sci. Instrum. 62, sid 2218-2227, september 1991.
10. Hollenberg, Klaus. "*Druckmessung an Stosswellen in Flüssigkeiten und Festkörpern*", Düsseldorf universitet, Docentavhandling, juni 1983.
11. Streich, Martin. "*Stosswellendruckmessungen an Gewerblichen Sprengstoffen*". Kompendium från 17:e Internationella konferensen för Driv-och Sprängmedel, Karlsruhe, Tyskland, juni 1986.
12. Scholz, Friedermann. "*Über die Druckbeeinflussung von Sprengladungen durch die Schwaden früher detonierender Nachbarladungen beim Sprengen mit Millisekundenzündern im Karbongestein*". Heft 16, Versuchsgrubengesellschaft mbH, Dortmund, 1981.
13. Wilson, W.H., Holloway, D.C. och Bjarnholt, G. "*Measurement of Pressure Loadings from Explosively Loaded Boreholes used Expendable Piezoresistive*

Transducers". Proceedings of the 1987 American Society of Mechanical Engineers Meeting, Cincinnati, Ohio, USA, June 14-17, 1987.

14. Nie, Shulin. "*Borehole Pressure in Blast Holes. Measurements in granite blocks versus estimations*". SveBeFo Rapport 42, 1999.

JÄMFÖRELSETABELL FÖR TRYCKENHETER

Tryck, mekanisk spänning

Pa	bar	kp/cm² at	atm	lbf/in² (psi)
1	10×10^{-6}	$10,197 \times 10^{-6}$	$9,869\,2 \times 10^{-6}$	$0,145\,04 \times 10^{-3}$
100×10^3	1	1,019 7	0,986 92	14,504
$98,066 \times 10^3$	0,980 66	1	0,967 84	1,423
$9,806\,6 \times 10^6$	98,066	100	96,784	$1,422\,3 \times 10^3$
133,32	$1,333\,2 \times 10^{-3}$	$1,359\,5 \times 10^{-3}$	$1,315\,8 \times 10^{-3}$	$19,337 \times 10^{-3}$
$101,32 \times 10^3$	1,013 2	1,033 2	1	14,696
$6,894\,8 \times 10^3$	$68,948 \times 10^{-3}$	$70,307 \times 10^{-3}$	$68,046 \times 10^{-3}$	1

FIGURER 1 - 49