© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

PRECISIONSSPRÄNGKAPSELN - EN BERGSPRÄNGARES DRÖM

Bernt Larsson, Roger Holmberg och Jan Westberg,
Nitro Nobel AB

Historisk bakgrund

För att ett sprängämne skall detonera krävs någon form av initiering, där tändanordningen ger tillräcklig effekt för att garantera en säker reaktion i sprängämnet.

När svartkrut på 1600-talet började användas i stället för tillmakning inom gruvbrytningen var marknadskraven i första hand att medelst någon initieringsmetod uppnå tillräcklig tändeffekt, samtidigt som den som utlöste tändanordningen kunde befinna sig på säkert avstånd från detonationen. Många innovationer såg dagens ljus - allt ifrån upptändningsanordningar med krutfyllda halmstrån till sådana metoder där en pappersstrut, fylld med långsambrinnande sats, fick löpa längs en lina uppspänd från en säker avfyrningsplats ner till det lägre belägna sprängborrhålet, laddat med krut.

Först när krutstubinen uppfanns av W. Bickford 1831 kunde användaren initiera sprängämnet på ett säkert sätt framme vid sprängplatsen. Krutstubinen, som brann med en brinntid av ca 120 sek/m, kombinerades med en svartkrutsfylld hylsa av trä eller papp. Den utveckling som sedan har skett återspeglas i fig. 1.

När Alfred Nobel på 1860-talet utvecklade Nobels Initialtändare i form av en liten metallhylsa laddad med kvicksilverfulminat, blev det möjligt att på ett säkert sätt initiera nitroglycerin liksom den av Alfred Nobel 1866 uppfunna Guhr-dynamiten.

Först på 1900-talet introducerades i Sverige en sprängkapsel med en noggrannhet i sekundområdet. Sprängkapseln bestod av en tändhatt med upp till 20 cm krutstubin, vilken initierades med elektricitet och tändpärla. Genom att använda olika längder på krutstubinen var det möjligt att variera fördröjningstiderna, men precisionen var dålig.

Omkring 1920 infördes intervallsprängkapseln med intervallsteg i sekunder. Det var dock ej möjligt att med dess låga precision spränga stora salvor med en god fragmentering och att samtidigt undvika stenkast och minimera markvibrationerna.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

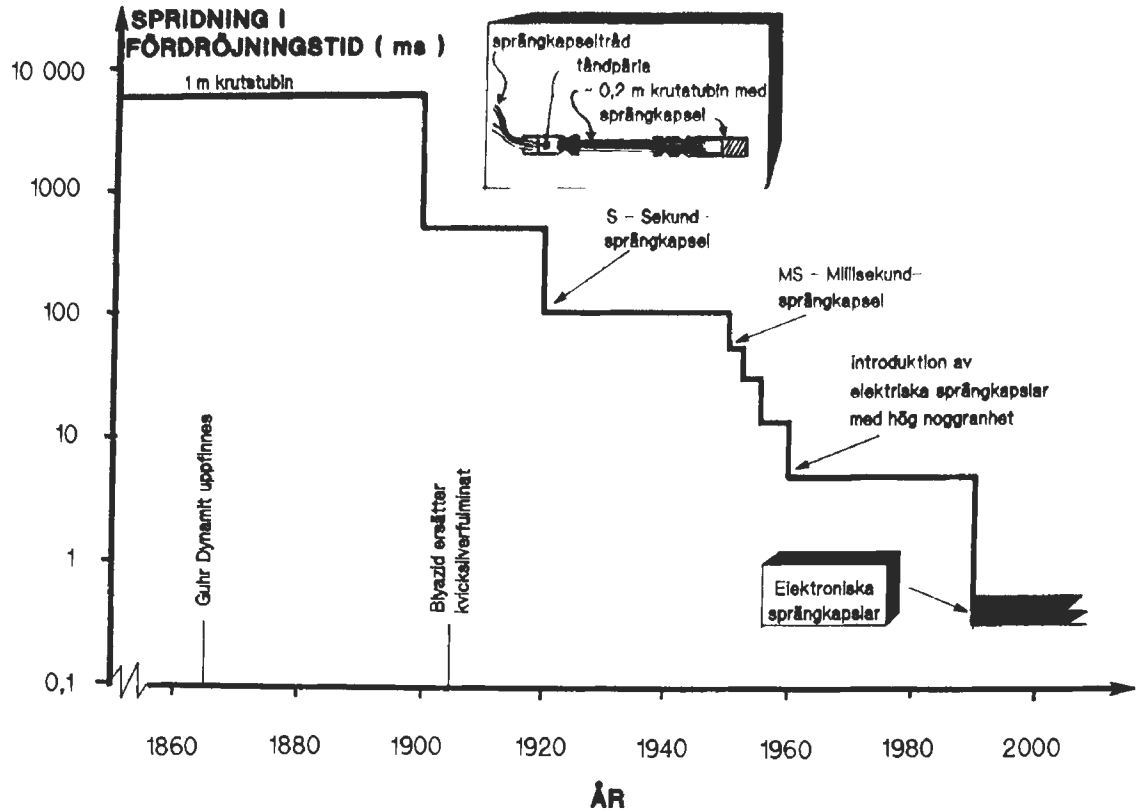

Fig. 1. Historisk återblick på tidsprecisionens förbättring.

På 1940-talet pågick stora bergsprängningsarbeten i Stockholm, och 1946 påbörjade Nitro Nobel AB's detoniklaboratorium i Vinterviken en undersökning om hur markvibrationer kunde reduceras. Forskarna frångick de intervalltider på 0,5-1,0 sek som fanns på de då existerande elsprängkapslarna och undersökte, om kortare intervalltider bidrog till interferens och möjlig utsläckning av markvibrationerna. En speciell apparat för kortintervallsprängning konstruerades, och den gav tillsammans med el-momentsprängkapslar fördröjningstider i området 10-100 ms. Stora sprängningstekniska framsteg gjordes, och kortintervallsprängning infördes på allt fler sprängplatser.

Omkring 1950 introducerades millisekundsprängkapseln med intervalltider i storleksordning 25 ms. Under tiden från 1950 och till i dag har utvecklingen av pyrotekniska satser successivt förbättrat noggrannheten till en nivå som ligger på 1,5 - 2,5 % av den totala fördröjningstiden.

De tändsystem som i dag finns på marknaden kan delas in i fyra huvudgrupper:

a) Elektrisk tändning
b) Icke-elektrisk tändning med pyroteknisk fördröjning (inkl NONEL -systemet)
c) Detonerande stubin
d) Krutstubin

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Fig. 2 visar marknadsfördelningen i västvärlden av de fyra huvudgrupperna.

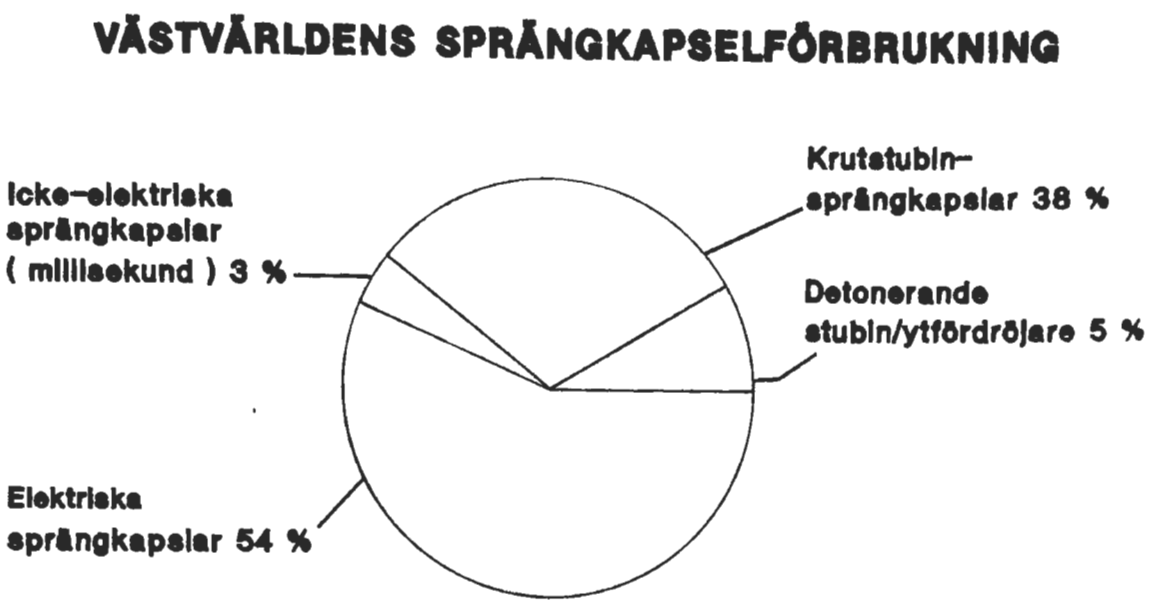

Fig. 2. Västvärldens sprängkapselförbrukning.

Ju högre precisionen är, desto större är också möjligheterna att förbättra och effektivisera våra bergsprängningsarbeten. Utvecklingen av halvledartekniken har under den senaste 10-årsperioden också möjliggjort att åstadkomma kraftigt förbättrad tidhållning genom användning av miniatyriserade, integrerade kretsar. Det har därför varit naturligt för Nitro Nobel att som ett av sina viktigaste utvecklingsprojekt under 1980-talet ta fram elektroniskt fördröjda sprängkapslar med noggrannhet i mikrosekundsområdet.

Systembeskrivning för Nitro Nobels elektroniska sprängkapsel

Nitro Nobels elektroniksprängkapselsystem bygger på en intim samverkan mellan systemets två huvudkomponenter, sprängkapseln och tändapparaten. Den ena av dessa komponenter kan inte fungera utan den andra.

Sprängkapsel

Till det yttre liknar den elektroniska sprängkapseln konventionella elektriska sprängkapslar. Den har samma format och är försedd med två anslutningstrådar. Kapslarna är numrerade med ett intervallnummer mellan 1 och 250.

Den elektroniska sprängkapseln är i stora drag uppbyggd så som framgår av fig. 3. I princip kan man säga, att den består av en elektronisk fördröjningsenhet kombinerad med en momentsprängkapsel.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

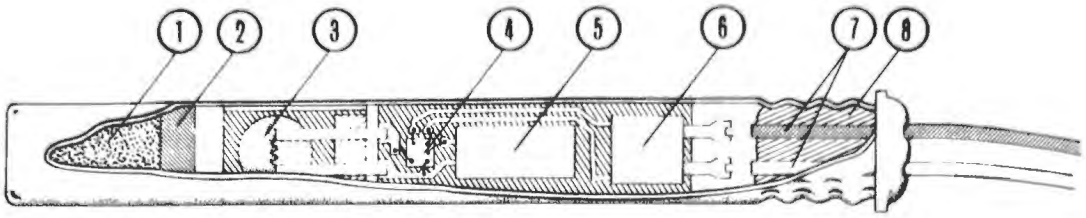

Fig. 3. Elektroniskt fördröjd sprängkapsel.

En integrerad krets, ett s k "chip" (4), utgör hjärtat i sprängkapseln, som i övrigt även innehåller en kondensator (5) för energilagring och separata säkerhetskretsar (6) på ingångssidan (mot sprängkapseltrådarna) för att skydda mot olika former av elektrisk överbelastning. Även chipet självt har interna skyddskretsar på ingångarna. Tändpärlan (3) för upptändning av sprängkapselns primärsats (2) är speciellt utvecklad för att ge kort upptändningstid med minimal spridning.

Den mest utmärkande egenskapen hos Nitro Nobels elektroniksprängkapsel är dess mycket stora flexibilitet. Intervallnumret anger t ex inte fördröjningstid, utan endast den ordningsföljd i vilken kapslarna kommer att detonera. Varje sprängkapsel har en egen tidsreferens, men den slutgiltiga fördröjningstiden bestäms i samverkan med tändapparaten först omedelbart före avfyring.

Olika varianter av elektroniksprängkapselsystem kan väljas, beroende på hur stort kundens krav är på att kunna ändra sprängkapslarnas fördröljningstid. Alla varianter är konstruerade på likvärdigt sätt för att uppfylla mycket högt ställda säkerhetskrav. Typiska egenskaper för den elektroniskt fördröjda sprängkapseln:

- Sprängkapseln har från början ingen egen tändenergi.

- Sprängkapseln kan inte fås att detonera utan en unik aktiveringskod.

- Sprängkapseln får tändenergi och aktiveringskod från tändapparaten.

- Sprängkapseln är försedd med överspänningsskydd. Låg överbelastning avleds via interna skyddskretsar. Högre spänningar (> 1000 volt) avleds via gnistgap. Stor överbelastning utlöser en säkring i sprängkapseln, vilket gör sprängkapseln obrukbar, dock utan att den detonerar.

- Tändsystemet arbetar med låga spänningar (< 50 volt), vilket är en stor fördel med hänsyn till risken för jordfel.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Tändapparat

Tändapparaten utgör centralen i tändsystemet. Den förser sprängkapslarna med energi och bestämmer vilken fördröjningstid varje intervallnummer skall tilldelas. Apparaten är mikrodatorstyrd och dess arbetssätt kan därför varieras med olika styrprogram, medan den hårdvarumässigt kan vara enhetligt uppbyggd. Detta ger en del av flexibiliteten i systemutformningen.

Målsättningen har varit att operatören på sprängplatsen skall ha ett enkelt och välbekant system att arbeta med. Därför har manöverorganen för initiering av salvan utformats på ett så konventionellt sätt som möjligt, trots apparatens avancerade uppbyggnad internt. Det finns på sedvanligt sätt en uppladdningsknapp och en avfyringsknapp. En lamptablå indikerar vad som händer och ger klarsignal när salvan är klar att avfyras. Även eventuella fel indikeras på tablån, och tändapparaten nollställer systemet om några fel upptäcks.

Utformningen av den första tändapparaten framgår av fig. 4. Den är mycket avancerad och ger möjlighet till helt fri tidgivning till sprängkapslarna inom systemgränserna. Tidsinformationen ligger lagrad i ett speciellt tidsminne i apparaten.

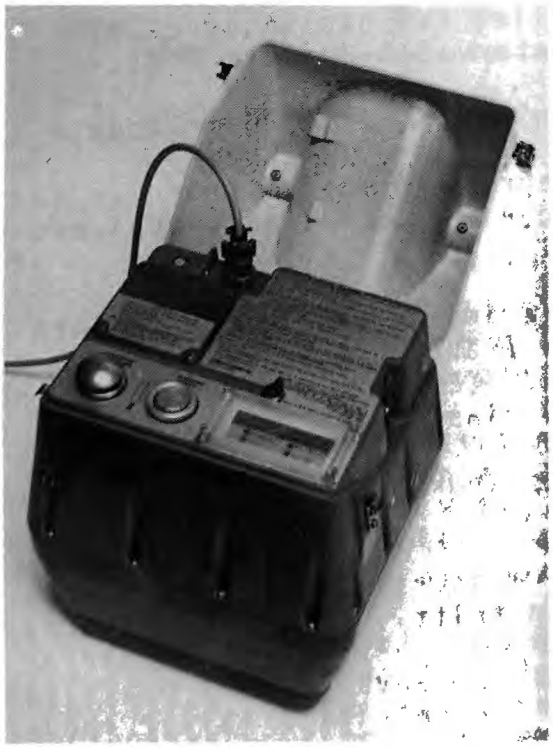

Fig. 4. Tändapparat för elektroniska sprängkapslar.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Tidgivningen till sprängkapslarna sker med hjälp av signalering med en unik kod. Kapslarna reagerar inte för något annat än denna kod från Nitro Nobels egen tändapparat och risken för initiering p g a oavsiktiga signaler från någon annan energikälla har därmed eliminerats. Tändapparaten utför också en kontroll av systemets funktionsstatus. Detta sker automatiskt i apparaten. Klarsignal för avfyring ges bara efter godkänt resultat av denna kontroll.

System

Den kund som önskar ett "konventionellt" system att arbeta med kan erbjudas ett sådant. Man har då ett fixt intervallsystem, där ett givet intervallnummer har en bestämd fördröjningstid, med t ex 25 ms intervalltid. Skillnaden mot dagens system blir då i huvudsak det stora antalet tillgängliga intervallnummer (vilket redan det ger mycket större variationsmöjligheter än i dag) samt precisionen i fördröjningstiderna.

En variant på systemet är att fördröjningstiderna hos kapslarna kan varieras, men att alla intervalltider i salvan är lika. Detta gör systemet mycket mer flexibelt.

Den kund som fullt ut önskar utnyttja fördelarna med elektroniksprängkapseln kan dock erbjudas ett mycket avancerat system. Typiska systemegenskaper blir då följande:

- Kortaste tid mellan två närliggande intervallnummer (= intervalltiden) är 1 ms.
- Längsta fördröjningstid är 6,25 sekunder.
- En kapsel med lägre intervallnummer kan inte ges en längre fördröjningstid än en kapsel med högre intervallnummer.
- Kapslar med olika intervallnummer kan inte ligga närmare varandra (räknat i millisekunder) än nummerskillnaden. (Exv. mellan nr 10 och nr 20 måste det skilja minst 10 ms i fördröjningstid.)
- Maximalt antal sprängkapslar per tändapparat är ca 500 st.

Dessa regler innebär i stort sett obegränsade möjligheter att välja tider fritt. För att få önskade fördröjningstider för en given salva kan därför många olika nummeruppsättningar användas. I praktiken betyder detta att användaren för de flesta salvor endast behöver ha ett tillräckligt antal olika intervallnummer i lager, inte vissa speciella nummer som i dag.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Arbetssätt

I förberedelsearbetet för en sprängningsoperation ingår på sedvanligt sätt att bestämma fördröjningstiderna för varje borrhål i salvan och att ladda hålen med sprängkapslar med lämpligt valda intervallnummer. Tändapparatens tidsminne skall därefter programmeras med nödvändig tidsinformation, anpassad till de använda intervallnumren. Detta kan ske med datorhjälpmedel eller via en speciell programmeringsenhet, som kan anslutas till tändapparaten.

En principskiss över en uppkopplad salva framgår av fig. 5. Salvan kopplas parallellt med godtycklig polaritet. Sprängkapslarna ansluts därvid till en tvåtrådig bussledning via ett kopplingsblock med hjälp av en speciell kopplingstång. Någon avisolering av sprängkapseltrådarna eller bussledningen behöver inte utföras vid inkopplingen. Om det uppstår något fel, eller om sprängkapselns säkringsfunktion är utlöst, detekteras detta automatiskt av tången. Denna mätning kan också upprepas efter inkopplingen. Salvan förbinds sedan med tändapparaten via en kopplingsbox och en tändkabel.

PRINCIPSKISS ÖVER UPPKOPPLAD SALVA

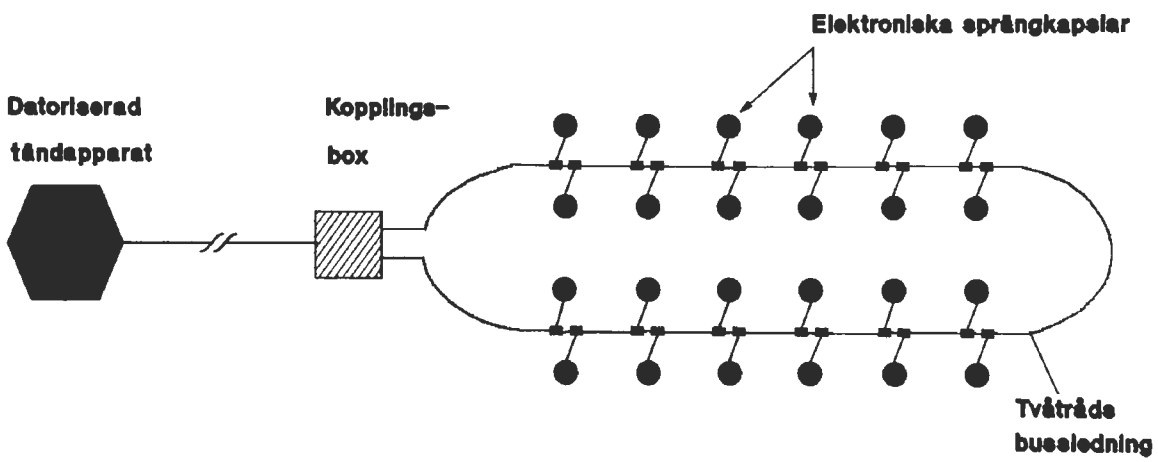

Fig. 5. Principskiss över uppkopplad salva.

Arbetssättet vid sprängning, liksom hur samverkan mellan tändapparat och sprängkapsel är utformad, framgår på ett förenklat sätt av fig. 6. Handhavandet omfattar två manuella operationer, och den exakta sprängningstidpunkten bestäms av operatören.

I övrigt sker allt automatiskt, men operationen kan ändå avbrytas ända fram tills tändsignalen har sänts till sprängkapslarna. Därefter frikopplas kapslarna från signaleringssystemet och detonerar med mycket hög tidsprecision.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

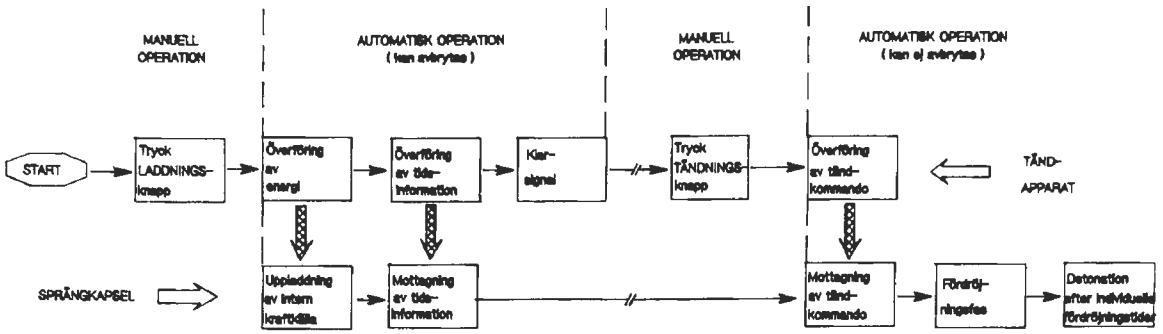

Fig. 6. Förenklat funktionsdiagram.

En jämförelse av dagens pyrotekniskt och morgondagens elektroniskt fördröjda sprängkapslar

Dagens pyrotekniskt fördröjda sprängkapslar har nått en nivå, både säkerhetsmässigt och noggrannhetsmässigt, där det är mycket svårt ur produktionssynpunkt att ytterligare höja kraven. Med morgondagens elektroniska sprängkapslar uppfylls huvuddelen av de ökande marknadskraven. Här nedan följer en jämförelse av egenskaperna säkerhet, noggrannhet och flexibilitet.

Säkerhet

Skydd mot oavsiktlig tändning, samtidigt som initieringen sker på avsett sätt, är en förutsättning för ett modernt tändsystem.

Den elektroniska sprängkapseln har hög säkerhet mot alla former av oönskad elektrisk ström. Fig. 7 visar en jämförelse mellan de vanligast förekommande elektriska tändsystemen, NONEL® och den elektroniska sprängkapseln med avseende på känslighet för tändning med likström.

Säkerhet mot oavsiktlig tändning genom statisk elektricitet jämförs i fig. 8. Jämförelsen är gjord med de vanligast förekommande sprängkapslarna och för de krav som gäller i Sverige och Norge.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

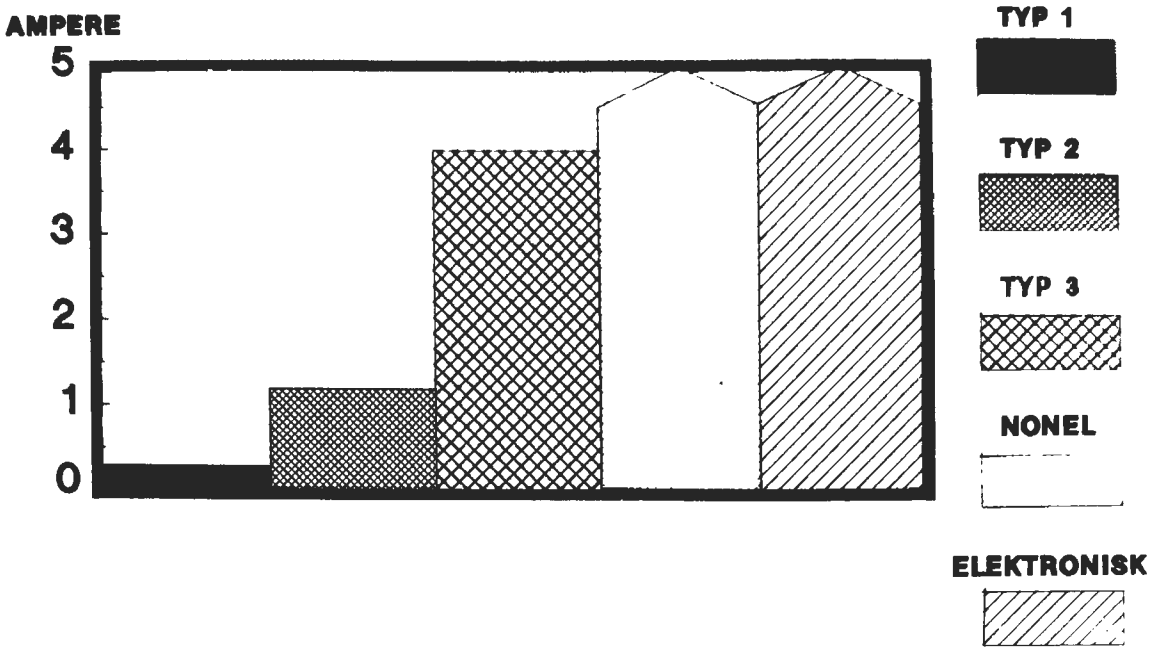

Fig. 7. Säkerhet mot oönskad elektrisk ström.

	TYP 1 TE	TYP 2 VA	TYP 3 HU	NONEL	ELEKTRONISK SPRÅNGKAPSEL
1. Urladdning mellan hylsa och kortslutna sprängkapseltrådar					
Krav					
Sverige	----	300 pF 15 kV	----	>2500 pF 30 kV	>2500 pF 30 kV
Norge	300 pF 15 kV	300 pF 15 kV	2500 pF 30 kV	>2500 pF 30 kV	>2500 pF 30 kV

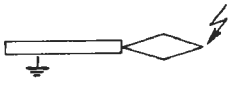

Fig. 8. Säkerhet mot oavsiktlig tändning genom statisk elektricitet.

Noggrannhet

I begreppet noggrannhet ligger i första hand noggrannhet i tidhållningen. Genom ständig produktutveckling har sprängkapslarnas noggrannhet ökat under det senaste seklet. Detta har i sin tur gjort det möjligt att förbättra sprängningstekniken.

De krav som ställs upp i dag är i huvudsak grundade på att överlappningsrisken mellan intilliggande intervallnummer skall minimeras.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Det acceptansvillkor som i dag utnyttjas i Sverige kan skrivas:

$T\ddot{o} - \bar{x} < 1{,}5\ s$

$\bar{x} - Tu > 1{,}5\ s$

Där $\bar{x}$ = aritmetiska medelvärdet för fördröjningen

s = standardavvikelsen

Tö = övre toleransgräns (nominell fördröjningstid Tn + 0,5 x intervallet Ti)

Tu = undre toleransgräns (nominell fördröjningstid Tn - 0,5 x intervallet Ti)

Om det förutsätts att fördröjningstiderna inom varje intervallnummer är normalfördelade, och om acceptansvillkoret uppfylls, blir sannolikheten för att två intilliggande borrhål med närliggande intervallnummer ej skall överlappa större än 98%.

För att belysa de felkällor som har betydelse för en sprängkapsels tidsnoggrannhet beskrivs här uppbyggnaden av en elektrisk sprängkapsel (fig. 9).

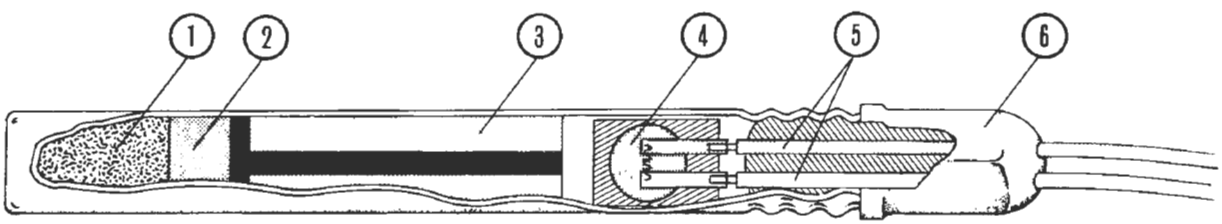

Fig. 9. Konventionell elektrisk sprängkapsel.

För olika elektriska säkerhetsnivåer används i dag minst fyra olika känsligheter hos en tändpärla (4). Tändpärlans konstruktion bygger på att en glödtråd värms upp av en genomflytande ström. När glödtråden blir tillräckligt varm, tänds en pyroteknisk sats som finns runt glödtråden. En tändpärla med hög säkerhet mot oavsiktlig tändning har en grövre glödtråd, vilket medför att det fordras en högre strömstyrka för att värma upp den. Uppvärmningstiden beror av tändströmmen enligt kurvorna i fig. 10.

Tändströmmen kan variera en hel del mellan olika salvor. Genom jordfel eller läckströmmar kan även olika sprängkapslar i en och samma salva få olika tändström, vilket också inverkar på tidsnoggrannheten.

Den mest betydelsefulla komponenten ur tidhållningssynpunkt är dock fördröjningselementet (3).

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

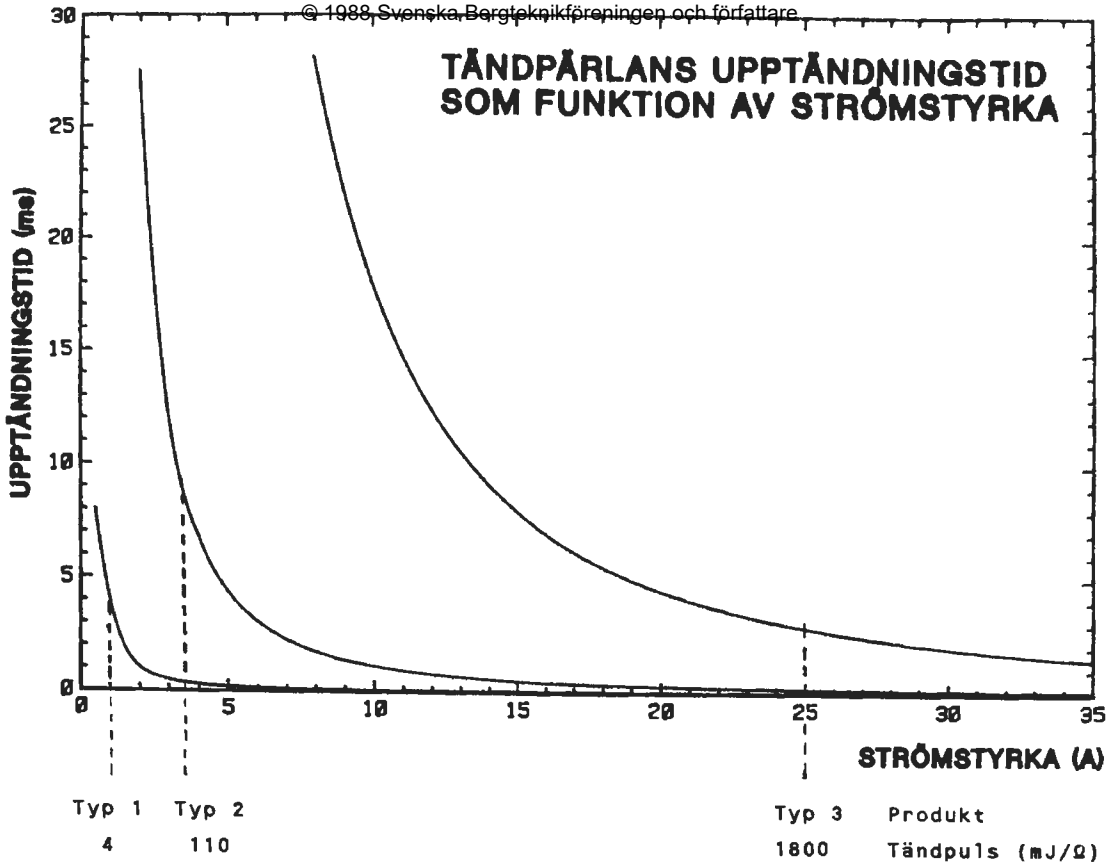

Fig. 10. Fördröjning i tändpärlan hos elektriska sprängkapslar.

Normalt bestäms tiderna genom att man ändrar längden på fördröjningselementet, men även olika pyrotekniska kompositioner med varierande brinntid används. Ungefärliga spridningar beskrivs som funktion av fördröjningstiden i fig. 11.

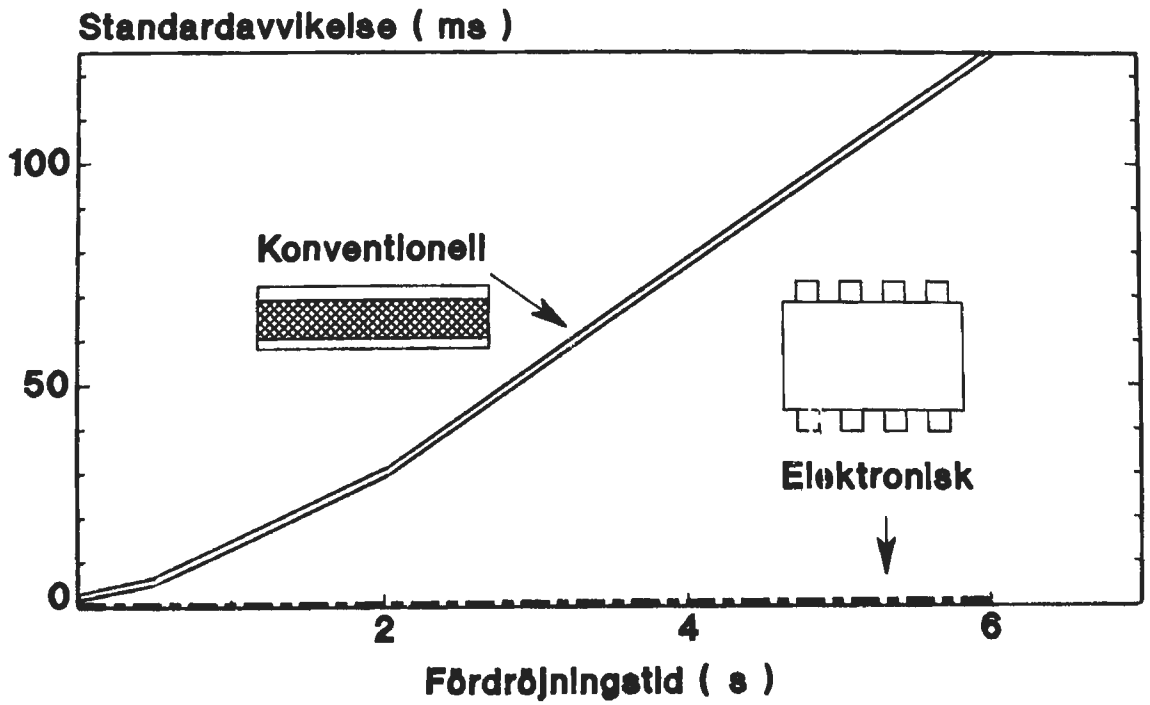

Fig. 11. Sprängkapslars tidsspridning.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Alla sprängkapslar som innehåller pyrotekniska satser påverkas av fukt och åldring. Detta innebär, att spridningen kommer att förändras vid lagring av sprängkapslarna.

Utöver åldringspåverkan inverkar fördröjningsatsens temperatur på fördröjningen. Olika fördröjningssatser påverkas olika mycket, men samtliga sprängkapslar blir snabbare vid ökad temperatur.

En uppföljning av Nitro Nobels produktion under 1986 av millisekundsprängkapslar med ett konstant intervall på 25 ms gav följande resultat:

Intervall-nummer	Medel-värde (ms)	Standardavvikelse (ms) i testserie	mellan test-serier	totalt
5	123,2	1,61	1,68	2,33
10	249,8	2,83	3,74	4,69
15	375,6	2,87	2,83	4,03
20	499,1	4,42	4,41	6,24

Den totala standardavvikelsen är ca 1,5% av fördröjningstiden. Vid längre fördröjningstider ökar denna siffra till ca 2,5% för 2-6 s fördröjning.

Den elektroniskt fördröjda sprängkapseln har en betydligt bättre precision. Vid en fördröjningstid på 6 s är standardavvikelsen ca 1 ms, vilket motsvarar ungefär 0,02% av fördröjningstiden. Detta är därmed ca 100 gånger bättre än för pyrotekniskt fördröjda sprängkapslar.

Flexibilitet

Med dagens tändsystem finns klara begränsningar vad beträffar antalet intervallnummer som går att utnyttja. Acceptansvillkoret som tidigare visats medför, att intervalltiden (Ti) skall vara minst 3 gånger standardavvikelsen (s). Detta betyder att maximalt antal intervallnummer blir:

$$\text{Max antal intervallnummer} = \frac{\text{total fördröjningstid}}{\text{intervalltid}}$$

där intervalltiden är 3 x standardavvikelsen.

Tillgängligt antal intervallnummer i ett pyroteknisk fördröjt tändsystem begränsar sig själv, p g a att standardavvikelsen ökar med ökad fördröjningstid.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

I ett elektroniskt fördröjt tändsystem finns i praktiken inte motsvarande begränsning, tack vare att standardavvikelsen där inte ökar nämnvärt vid ökad total fördröjningstid.

Antal tillgängliga intervallnummer och fördröjningstider för dagens pyrotekniskt fördröjda tändsystem framgår av följande tabell:

Serie	Intervall-nummer	Antal intervall-nummer	Intervall (ms)	Fördröjningstid (ms)
MS	1 - 20	20	25	25 - 500
	24, 28, 32, 36, 40, 44 och 48	7	100	600 - 1200
	56, 64, 72 och 80	4	200	1400 - 2000
HS	1 - 12	12	500	500 - 6000

För de elektroniskt fördröjda sprängkapslarna kommer det att finnas 250 olika intervallnummer. Dessa kan programmeras för intervalltider från 1 ms till 6 s. Det tillgängliga antalet intervallnummer visas som funktion av intervalltiden i fig. 12.

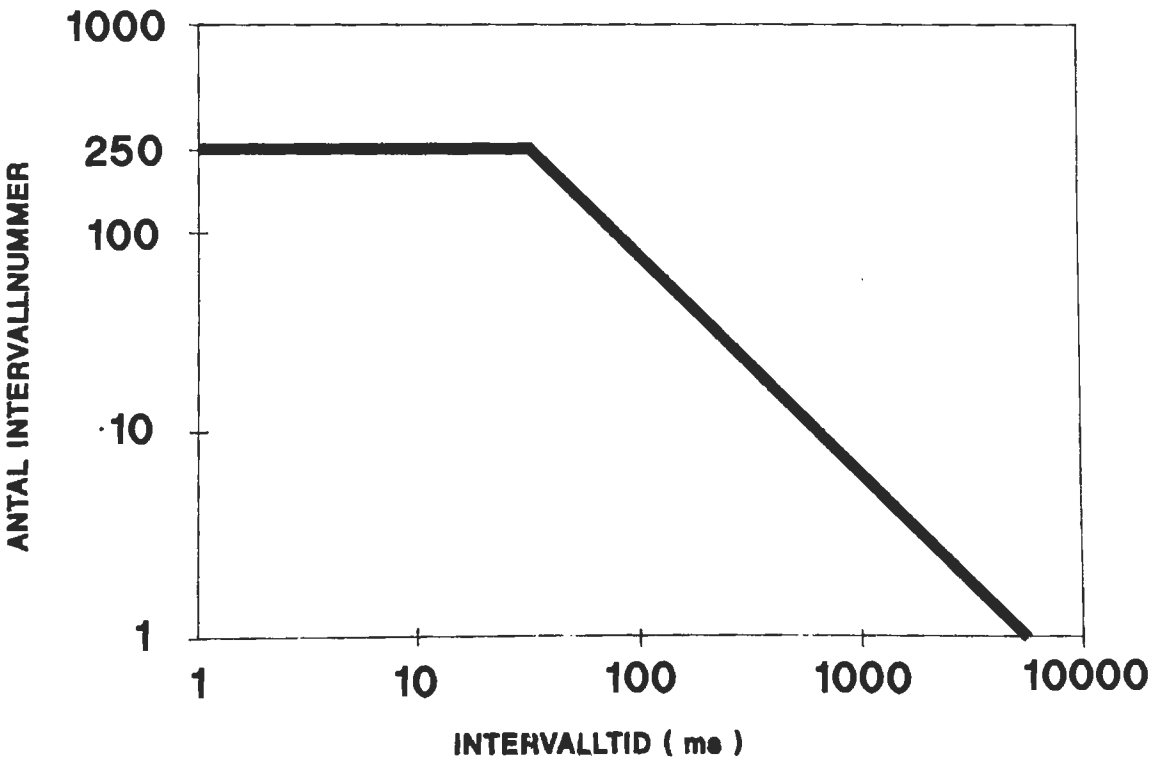

Fig. 12. Antalet intervallnummer för elektroniska sprängkapslar.

Genom att sammankoppla flera tändapparater kan kortaste intervalltiden minskas till 0,5 ms, antalet intervall ökas till flera tusen och antalet sprängkapslar i en och samma salva ökas obegränsat.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Ökade marknadskrav

Forskningen under de senaste decennierna har visat att en bättre precision kan förbättra dagens sprängningsmetoder i flera avseenden. Den oönskade överlappning eller "hopträngning", som för närvarande ibland inträffar när pyrotekniska satser används, kan definitivt undvikas när elektroniska sprängkapslar tas i bruk.

De marknadskrav som bättre skulle kunna uppfyllas med elektroniska sprängkapslar är följande:

- Reducering av markvibrationer
- Bättre fragmentering
- Mindre skador på kvarstående berg
- Ökade salvstorlekar
- Reducering av stenkast
- Ökade indrifter vid ortdrivning
- Ökad potential för utveckling av nya sprängmetoder

Vid sprängning i tätorter och i närheten av vibrationskänsliga byggnader, maskiner, installationer etc, är det ofta ej möjligt att spränga optimalt, sett ur kostnadssynpunkt. På många håll har myndigheterna i dag rekommenderat mycket låga gränsvärden för markvibrationer. Dessa är i första hand relaterade till människans störningskänslighet, mer än till en reell risk för skador.

Flera forskningsprojekt har rapporterat, att om mer noggranna sprängkapslar används, så ökar möjligheterna att anpassa markvibrationernas amplitud och frekvensspektrum. Användaren kan därmed på ett bättre sätt minimera sina sprängningskostnader och reducera störningarna på omgivningen.

Genom att använda elektroniska sprängkapslar med deras överlägsna precision undviker man riskerna för överlappning. Detta ger användaren större säkerhetsmarginal eftersom oavsiktliga stenkast från inspända borrhål kan undvikas.

Användarna har i dag mycket höga krav på att uppnå god fragmentering och därmed reducerade kostnader för sekundärsprängning, lastning, transport och krossning. För att ge en god fragmentering bör fördröjningen ej vara längre än ca 6 ms per m hålavstånd. Dagens pyrotekniska millisekundsprängkapslar har, som vi tidigare sett, en spridning som kan uppgå till ± 6 ms.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Med tidsprecisionen hos elektroniska sprängkapslar bör det vara möjligt att låta stötvågsinducerade spänningar samverka med det kvasi-statiska spänningsfältet från närliggande hål och att på så sätt förbättra fragmenteringen. Framtida fragmenteringsförsök med elektroniska precisionssprängkapslar får utvisa vilka fördelar som finns. Under alla omständigheter blir det möjligt att minska randproblemen. Kortare intervalltider med bättre precision minskar risken att bakåtbrytning förstör ännu odetonerade hål i den närliggande raden.

Det stora antalet intervallnummer som blir tillgängligt, när elektroniska sprängkapslar introduceras på marknaden, kommer att svara upp mot de krav marknaden har beträffande massprängningar i underjordsgruvor, där tusentals hål kan ingå.

Exakta och korta intervalltider också vid lång fördröjningstid möjliggör även en skonsammare sprängning mot kvarstående berg. I tunneldrivning t ex blir det möjligt att låta konturhålen samverka i högre utsträckning, så att bergutfall och onödig sprickbildning undvikes.

Kortintervalltekniken utvecklades i samband med att de pyrotekniska satserna gjorde det möjligt att spränga med millisekundnoggrannhet. På samma sätt kommer med största sannolikhet en revolutionerande utveckling att ske när tekniken nu har gjort det möjligt att arbeta med tidsprecision i mikrosekundområdet, med hjälp av den elektroniskt fördröjda sprängkapseln.