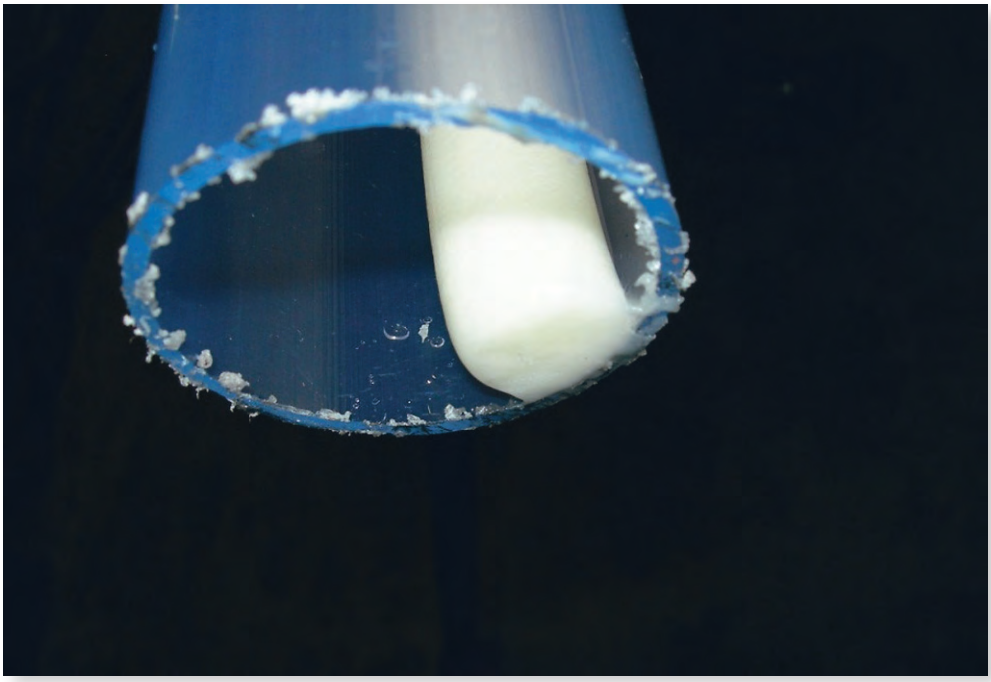
© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

10. Tunneldrivning med pumpemulsion – erfarenheter av sprängämne, utrustning och laddningsarbete

Mats Olsson, EDZ-consulting AB, Bengt Niklasson, Geosigma AB



Inledning

Många stora och komplicerade tunnelprojekt pågår och planeras för närvarande. En stor del av dessa arbeten innebär tunneldrivning i tätbebyggda områden vilket ställer stora krav på utförandetekniken för att uppnå och verifiera de högt ställda kraven på produktivitet, skadezoner, vibrationsnivåer, miljön och arbetsmiljö.

Sedan pumpemulsionstekniken introducerats i Sverige under andra halvan av 90-talet har den snabbt blivit den vanligaste laddmetoden för tunnelsalvor. Tekniken kräver goda kunskaper om hur sprängämnet tillverkas i laddenheten och hur det laddas i borrhålet.

Föredraget är en sammanfattning av ett BeFo-projekt som nyligen genomförts. Föredraget kommer bl.a. att belysa för- och nackdelar med pumpemulsion, beröra laddteknik och miljöfrågor samt diskutera riktlinjer för laddningsberäkningar.

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Pumpemulsionstekniken

Pumpemulsion under jord började användas i tunnlar i Norge 1994-1995 och fick också ett snabbt genombrott hos LKAB där emulsionen snabbt kom att ersätta Anfo. Pumpemulsion fick sitt stora genombrott bland entreprenörer i Sverige i samband med byggandet av Arlandabanan och senare i Södra Länken.

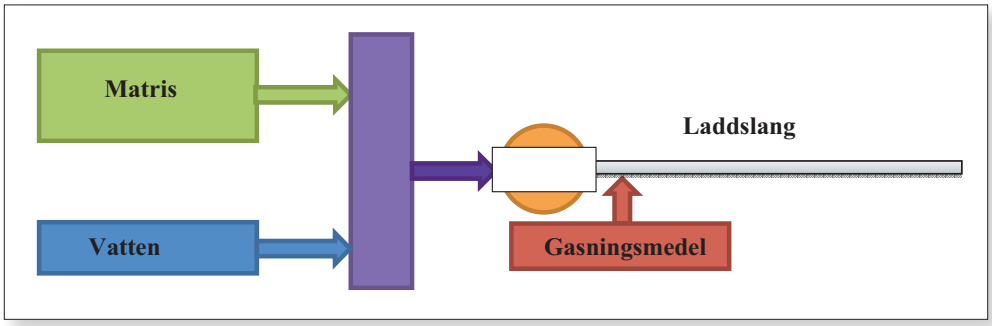
Det finns idag en handfull leverantörer i Sverige av pumpemulsion och laddutrustning för tunneldrivning. I stort sett består sprängämnet hos tillverkarna av ungefär samma huvudprodukter och de är:

- Ammoniumnitrat 60-80 vikt %
- Natriumnitrat 0-15 vikt %
- Vatten 15-25 vikt %
- Högraffinerad mineralolja 3-8 vikt %
- Emulgatorer 0,5-5,0 vikt %

Systemet är uppbyggt kring en tillverkarstation för emulsionsmatrisen. Matrisen fylls därefter över till tankbil för transport till arbetsplatsen. Transporten sker som en ADR-klass 5.1 där bilens tank skall vara av medbrinnande typ för att undvika explosion vid en ev. tryckhöjning i tanken.

På arbetsplatsen pumpas matrisen vanligtvis över till ett annat lagringskärl. Detta lagringskärl, eller lokalen där tanken förvaras, skall vara uppvärmt. Matrisen skall ha en jämn temperatur på ca 20 grader för att fungera bäst. Matrisen brukar ha ett ”bäst före datum” på ca 3 månader från tillverkningsdatumet.

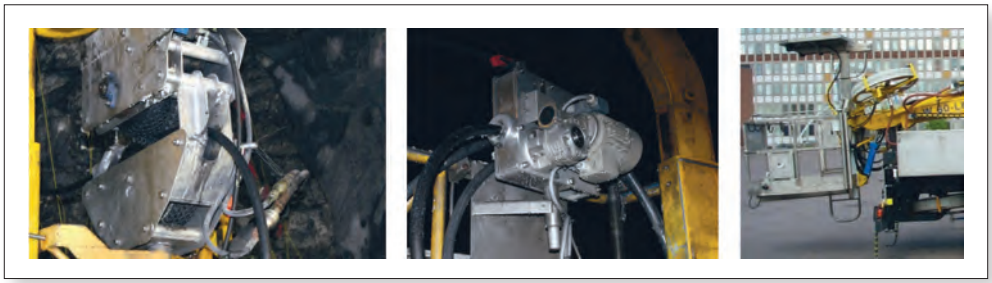
Laddfordonet är försett med tankar för matrisen, gasningsmedlet och vatten. Vid laddning pumpas matrisen, med tillsats av gasningsmedlet och vatten, ut i hålet via en PVC-slang och en jäsningsprocess inleds som innebär att sprängämne bildas i hålet. Figur 1 visar en schematisk bild av laddningsförfarandet.



Figur 1. Förenklad bild av pumpemulsionsladdning

Genom att variera pumpens varvtal och utdragningshastigheten av slangen kan spräng-ämnesmängden varieras. Flödesmätning förekommer dock inte på någon laddutrustning.

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

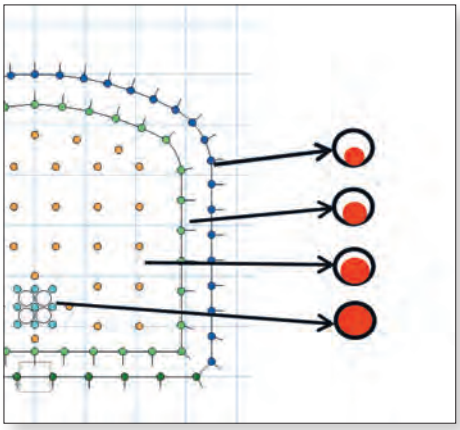


Figur 2. Några olika typer av slangmatare (Foto EDZ-consulting och LKAB)

Leverantörernas laddutrustningar för emulsionsladdning skiljer sig inte så mycket utan består huvudsakligen av en bärare, tankar för råvaror, pumpar, slangdragare, datorstyrenhet och ett kraftpaket. Det finns även kompakta enheter som kan lyftas på valfri bärare och i detta fall används ofta borrutrustningen som bärare av laddkorgen.

Slangens utdragningshastighet regleras av en slangmatare, alternativt en slangvinda, se Figur 2. Slangmataren består av gummihjul eller tandade aluminiumhjul som pressas mot slangen. Hastigheten på dessa hjul varieras för olika laddningsmängder. Slangmataren styrs antingen av en hydraulisk motor eller av en elektrisk motor där den elektriska mataren ger en bättre precision. Laddning görs från en laddkorg på laddfordonet eller på borriggen. Slangdragaren sitter normalt på laddkorgen.

Vanligtvis laddas de lägst belägna hålen i salvan manuellt med en separat laddslang medan slangmataren används för övriga hål. Det förekommer även bärbara slangmatare för marklinjen.



Figur 3. Laddningsmängder

Oftast finns ett antal förprogrammerade inställningar på laddningsmängden vilket innebär att denna kan justeras mellan ca 0,35 kg/m till 1,6–1,8 kg/m för ett 48 mm hål, se ett typexempel i Figur 3. Inställningarna för laddningsmängder görs via en datorskärm på laddutrustningen.
En relativt snabb utdragning av laddslangen ger en laddningsdiameter på ca 25 mm efter gasning vilket motsvarar en laddningskoncentration på ca 0,35 kg/m. En lägre utdragnings-hastighet ger högre laddningskoncentration. Laddsträngen är ofta mycket jämn vid laddnings-koncentrationen 0,35 kg/m men kan börja ondulera vid högre koncentrationer, se Figur 4.

Vid bottenladdning kan det vara svårt att få rätt mängd bottenladdning beroroende på svårigheten att styra utdragningshastigheten. Nyare och bättre teknik på slangdragarna har dock förbättrat precisionen avsevärt.

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Figur 4. Jämn laddsträng och ondulerande laddsträng (Foto Forcit, EDZ-consulting)

Vid s.k. referensborrning borras samtliga hål i salvan till ett bestämt plan eller en bestämd sektion. Det innebär oftast att hållängden varierar mellan hålen pga. att tunnelfronten är ojämn vid påhugg. Är hålet längre än hållängden för den laddningsvikt som förvalts innebär detta att laddningen blir för kort med dåligt utslag som resultat. Är hålet för kort för vald laddningsvikt riskeras spill. Då inte referensborrning tillämpas borras alla salvans hål lika långa och samtliga hål är då anpassade efter vald laddningsvikt.

Pumpemulsion detonerar vanligen med en hastighet på 2-6000 m/s beroende på laddsträngen och primern. Leverantörerna rekommenderar att pumpemulsion ska initieras med en primer med hög detonationshastighet. Det är viktigt att emulsionen omger primern för en säker initiering.

Laddarnas erfarenheter av pumpemulsionstekniken

Generellt har laddarna goda erfarenheter av pumpemulsionsladdning. De upplever att laddningstekniken är enkel och att det går snabbt att ladda en salva. Det kan dock vara svårt att reducera laddningsmängderna vid de nedre vägghålen och sulhålen eftersom det är svårt att komma åt dessa hål från laddkorgen. Glasögon med efterföljande omskjutningar är vanliga, speciellt i sprickigt berg och vid salvlängder över ca 5 m. Laddarna efterlyser bl.a. tätare serviceintervaller på laddutrustningen, tåligare elektronik och separata pumpar för varje laddlinje.

Miljö i omgivningen och arbetsmiljö

Emulsionsprängämnen är kvävebaserade. Kväveföreningar har hög vattenlöslighet och läckage av kväve riskerar därför så småningom att hamna i grundvattnet. Kväveutsläppen från sprängningsarbeten kommer främst från odetonerade laddningar och spill. Spillet kan dels uppstå vid uppstart av laddningsarbetet då vatten pumpas ut ur laddslangen, dels under laddningen oftast då vid för kort avladdning, samt spill efter laddning då slangen vattenspolas.

Laddning med pumpemulsion reducerar tunga lyft och mängden emballage (som ofta lämnas på stuffen). Emulsionen är dock kladdig och fastnar i arbetskläderna vilket medför att laddarna ofta måste byta arbetskläder.

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Riktlinjer för laddningsteknik

Då pumpemulsionen kom ut på marknaden i Sverige utlovade leverantörerna att hålmönstret vid ovanjordsbruk kunde glesas ut i jämförelse med om Anfo användes. Uppmaningen var inte lika tydlig för tunnelanvändning men det fanns en tro att emulsionssprängämnet hade en bättre verkan i berg än Anfo.

Vid en jämförelse av viktstyrkan mellan en pumpemulsion och Anfo, båda med en ungefärlig densitet av 900 kg/m^3, anges viktstyrkan för emulsionen vara ca 80 % av Anfo. Ökas densiteten på emulsionen stiger viktstyrkan för att vid en densitet på ca 1200 kg/m^3 ligga lika med eller högre än för Anfo.

En hel del arbete utfördes under slutet av 80-talet och början av 90- talet med att försöka beskriva emulsionens styrka i jämförelse med andra sprängämnen. Det hävdades då, trots emulsionens lägre viktstyrka, att den hade en bättre förmåga att bryta och fragmentera berg än Anfo.

Typiska borrplaner för tunnelsprängning med emulsionsprängämne skiljer sig inte nämnvärt från borrplaner gjorda för Anfo. Försättningarna varierar från ca 0,9–1,1 m beroende på hålens placering i salvan. Eftersom viktstyrkan för emulsionsprängämnet vid samma densitet är 20 % lägre än för Anfo borde försättningen minska med motsvarande, men detta är alltså inte fallet. Viktstyrkan är sålunda inte direkt användbar som jämförelsetal.

Emulsionssalvor där samtliga hål strängas behövs dels för att reducera skadezonen men även pga. kraven på låga vibrationsvärden. Detta krav innebär att den samverkande laddningen måste hållas låg. För att undvika avkortning av salvan kan laddningskoncentrationen i samtliga hål stället reduceras genom strängad laddning.

Normalt innebär detta att hålsättningen förtätas något för att korrigera för den lägre laddningskoncentrationen. Denna korrigering kan för en 10 m bred tunnel innebära något enstaka hål mer per horisontell rad i salvan vilket totalt kan göra att hålantalet ökar med 5–7 hål. Fördelen med att kunna driva ett par meter längre salva överväger naturligtvis arbetet med att borra ett antal extra hål.

Tabell 1–2 visar några erfarenhetsvärden från en strängladdad 5,2 m emulsionssalva.

Tabell 1. Erfarenhetsvärden för hålsättning och laddningskoncentration av en salva

Håltyp	Laddn.konc. kg/m	Försättning m
Öppningshål	1,1 – 1,4	Normal
Strosshål	1,1 – 1,2	0,9
Hjälparhål	0,9	0,8
Konturhål	0,3 – 0,4	0,6 – 0,7

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Tabell 2. Exempel på laddplan för en tunnelsalva

Håltyp	Laddn.konc. kg/m	Bottenladdning kg	Avladdning m
Kontur	0,35	0,3	0
2:a kontur	0,35	0,8	0
Bottenhål	1,1	1,6	0,5
Öppningshål	1,1	1,6	0,5
Strosshål övre	0,9	2	1
Strosshål nedre	1,1	2,4	0,5

Vanligtvis kan samtliga hål i salvan strängladdas, även öppningshålen som normalt är mycket överladdade. Praktiskt sett kan alltså samma hålsättning användas för pumpemulsion som för Anfo, vilket innebär att laddtabeller från våra vanligaste handböcker även kan användas för pumpemulsion. Lokala bergförhållandena kan påverka hålsättningen mer än om en salva strängladdas jämfört med en salva med fulla strosshål.

Kunskapen om detonationsförloppet i en strängad emulsion är idag begränsad vilket innebär att det inte finns annat underlag för att bestämma borr- och laddplaner för strängade emulsionsalvor än de praktiska försök som utförts i tunnelprojekt.

Referensobjekt

Som referensobjekt valdes att närmare studera pågående utbyggnad av SKB:s Äspö-laboratorium. Vid uppstarten av utbyggnaden ställdes höga krav på såväl entreprenören som sprängämnesleverantören. Speciella borr- och laddplaner togs fram för SKB och anpassades till laddning med pumpemulsion och initiering med elektroniska sprängkapslar. I Tabell 3 visas exempel på hållayout och laddning samt SKB:s krav på laddningskoncentrationerna.

Tabell 3. Hållayout och krav på laddning i Äspö

Håltyp	Hålavstånd m	Försättning m	Laddning kg/m	Laddningskrav kg/m
Kontur	0,5	0,6	0,35	± 0,05
Hjälpare	0,6	0,8	0,50	± 0,05
Stross	0,8	0,8	0,80	± 0,10
Botten	0,7	0,5	1,80	± 0,05
Kil			1,80	± 0,10

Innan projektet startade genomförde sprängämnesleverantören egna tester för att verifiera att ställda krav på laddningen kunde uppnås. Resultatet av dessa tester blev mycket bra och noggrannheten var t.o.m. bättre än uppställda krav. Regelbundna tester på att verifiera laddningskoncentrationerna har därefter gjorts under projektet.

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Figur 5. Tunnelkontur i utbyggnaden av Äspölaboratoriet. (Foto EDZ-Consulting)

Efter sprängning mättes och utvärderades bl.a. antal synliga halvpipor, utsprängd area, geologi, borrnoggrannhet, laddningsmängder i hålen m.m. Figur 5 visar ett exempel på halvpipor i en salva. Mer data och resultat kommer att publiceras av SKB då utbyggnaden är avslutat.

Tunneldrivningen har gått bra och visat att det är möjligt att uppnå hög kvalitet då höga krav ställs på såväl borrning som laddning.

Sammanfattning av för- och nackdelar

Systemet med pumpemulsion har övervägande bra egenskaper. Här redovisas några för- och nackdelar med metoden.

Fördelar

- **Enklare transportklass och krav på lagring**
  Matrisen räknas inte som sprängämne och får därför en enklare transportklass än den för sprängämnen. Matrisen kräver inget speciellt godkänt förråd utan kan lagras i tank på arbetsplatsen
- **Sprängämne först i hålet**
  Pumpemulsionen blir sprängämne först efter att den känsliggjorts (gasning) i hålet
- **Emulsionsladdning är rationell**
  Eftersom emulsionen är pumpbar är laddningen rationell och sker med hög kapacitet

© 2013, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

- **Emulsionsladdningen är flexibel**
  Samma sprängämne kan användas för tunnelsalvans samtliga hål. Strängladdning medför att laddningsmängderna enkelt kan varieras och anpassas
- **Förbättrad arbetsmiljö**
  Inga tunga lyft och ingen risk för ”dynamitskalle”

Nackdelar

- **Känslig för avbrott**
  Pumpemulsion, och speciellt tunna strängar av emulsionen kan gå av. Eftersom sprängämnet har en låg överslagsförmåga kan detta innebära detonationsavbrott i laddningen. Emulsionssträngar kan också vara känsliga för vatten i hålen, flyta upp och av det skälet gå av
- **Känslig för sprickigt berg**
  Pumpemulsion riskerar att okänsliggöras pga. inläkande gas från närliggande hål eller avskjuvade borrhål
- **Speciell laddutrustning**
  Pumpemulsion fodrar en speciell laddutrustning som idag måste hyras av leverantören. Utrustningen kräver en regelbunden och kvalificerad service
- **Konsistensen**
  Pumpemulsion är kladdig och svår att få bort från kläder och verktyg

Referenser

1. Olsson M, Niklasson B. Tunneldrivning med pumpemulsion. BeFo-rapport 115 2012.