© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

UTNYTTJANDET AV MÄTNING UNDER BORRNING (MWD) FÖR OPTIMERING AV SPRÄNGNING I STORA DAGBROTT.

Helena Turtola, Stabilator AB, Stockholm, Shao-Quan Kou, Per-Arne Lindqvist, Luleå tekniska universitet, Luleå, Agne Ahlenius, Boliden Mineral AB, Boliden.

Inledning

Optimering av sprängning har under en lång tid varit en dröm för forskare och ingenjörer. Med optimering av sprängning menas här en bättre precision av salvgränser, optimering av styckefallsfördelning, reduktion av vibrationer, en bra profil på lastfronten som passar lastningen och transporten samt att sprängningen skall resultera i en jämn yta. De huvudsakliga svårigheterna som man stöter på vid design av sprängning är avsaknaden av information om de lokala variationerna hos berget vad gäller dess sprängnings egenskaper. Detta problem kan lösas genom att utveckla ett system som kan mäta och registrera händelser vid borrningen och tolka de registrerade parametrarna till bergegenskaper och stora geologiska strukturer.

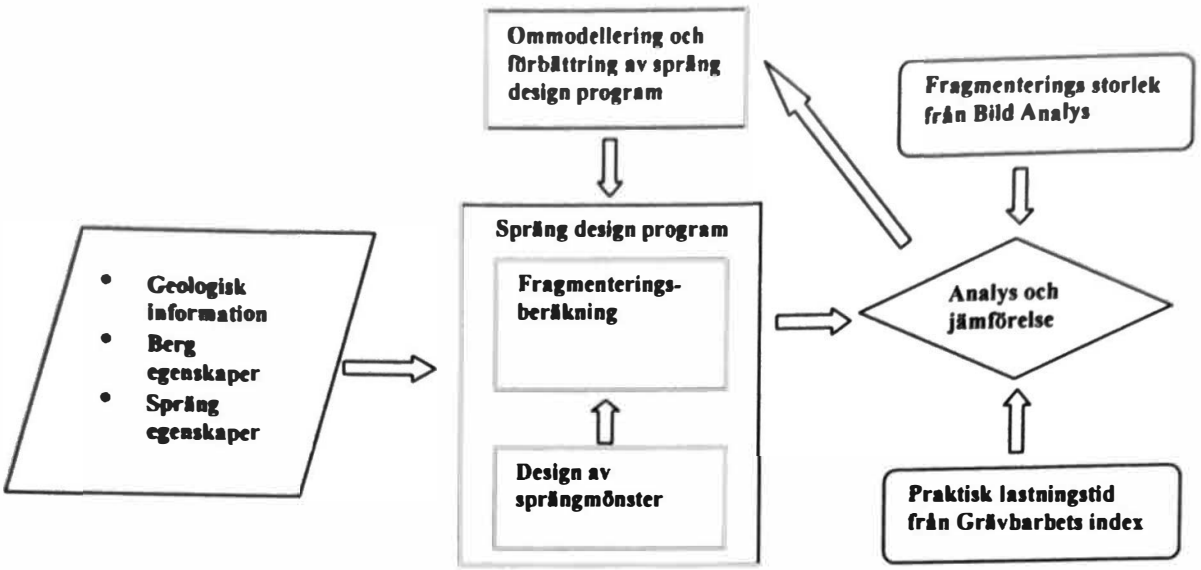
I Bolidens Aitikgruva pågår ett projekt där man behandlar möjligheterna att utveckla sprängningen i ett dagbrott för att göra dem mer effektiva. Boliden Mineral AB har under flera år samlat på sig erfarenhet inom ämnet [1]. De har även implementerat ett system där de registrerar olika parametrar från borrning, lastning och sprängning (fragmentering) för att kunna karakterisera bergförhållandena, optimera sprängningen samt mäta de resulterande gräv- och krossegenskaperna.

Det finns tre kategorier av parametrar som styr sprängningsresultatet. Dessa är de geologiska parametrarna hos salvan (bergets densitet, tryckhållfasthet, hos enskilda lokala bergarter, sprickavstånd, sprickorientering och stupning, etc.), geometriska parametrar hos sprängmönstret (hålavstånd, pallhöjd, borrhålsdiameter, etc.) samt energifördelnings parametrar (egenskaper hos sprängmedel och laddnings förfarandet inklusive detonations värme, densiteten hos sprängmedlet, intervalltider för sprängning, laddningslängder, etc.). De två senaste kategorierna av parametrar kan bestämmas och kontrolleras av en erfaren operatör. Ett bra dataprogram för sprängdesign och bestämning av sprängresultatet kan hjälpa operatören att fatta beslut om hur de geometriska parametrarna och energifördelnings parametrarna kan justeras i enlighet med variationen hos den geologiska informationen. Detta gör det möjligt att optimera sprängeffekten för att möta de förbestämda kraven när operatören förstår informationen om de geologiska parametrarna i salvan till fullo. Generellt kan man säga att Aitikgruvan har alla nödvändiga förutsättningar utom den exakta kunskapen om den lokala geologin.

En första metod att optimera sprängning är att använda ett datorprogram för sprängdesign tex. SAROBLAST utvecklat av Kou och Rustan [2], BOLFRAG utvecklat

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

av Boliden Mineral AB eller Blastec utvecklat av Nitro Nobel. Dessa program använder Kuz-Ram modellen utvecklad av Cunningham [3] för beräkning av styckefallsfördelningen. Efter jämförelse med den verkliga styckefallsfördelningen i gruvan som bestämts med hjälp av Bild Analys och Grävbarhets Index kan modellen för spräng design behöva förändras och förbättras tills en korrelation mellan den beräknade och den verkliga styckefallsfördelningen uppnåtts. Vår strategi för att optimera sprängning beskrivs i Figur 1.



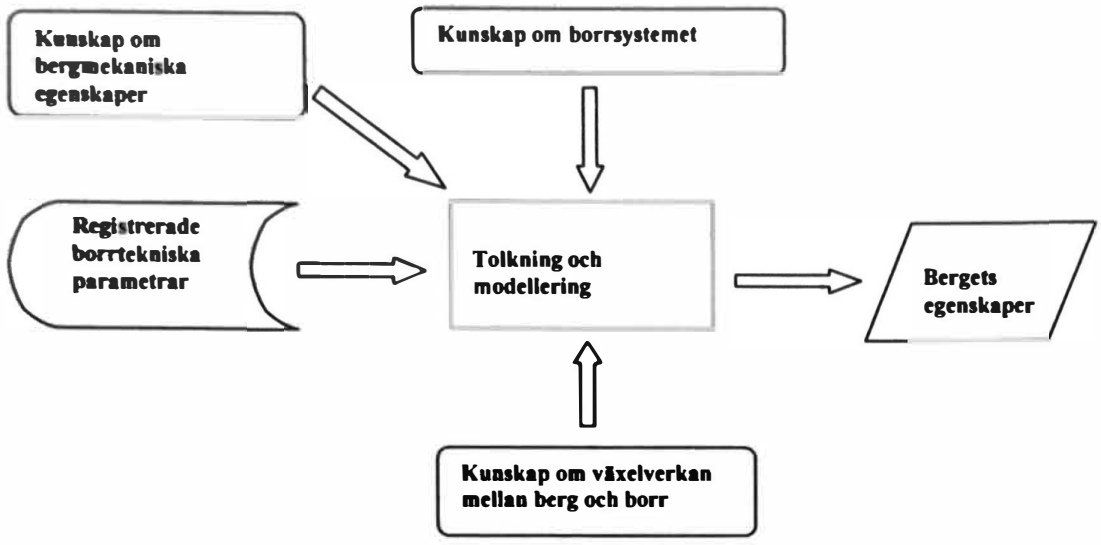
Figur 1. Strategier för optimering av sprängning i Aitik gruvan.

Diskussion om MWD-tekniken

Målet med arbetet att registrera och analysera borrparametrar är att fastställa en modell för design av sprängning på ett mer effektivt sätt dvs. att åstadkomma en optimal sprängning avseende lasttider och krossning. Tolkningen av de borrtekniska parametrarna fokuseras därför på att hitta samband mellan parametrarna och de bergegenskaper som påverkar sprängningsresultatet, som tryck- och draghållfasthet, E-modulen och densiteten men också stora geologiska strukturer som sprickzoner, förkastningar och skjuvzoner. Dessa samband kallas tolkningsmodeller. Idag finns den här typen av modeller framtagna men de flesta av dem är baserade på statistiska metodbaserade empiriska formler eller expert system (inkluderat neurala nätverk) för ett speciellt maskinsystem. I många fall fungerar dessa system mycket bra. En nackdel med dessa tillvägagångssätt är dock avsaknaden av fysikalisk mening. Det aktuella arbetet skiljer sig från dessa traditionella metoder på så sätt att fysikaliska/matematiska samband skall etableras. Tolkningsmodellen skall ha fysisk mening och maskin parametrarna skall också inkluderas i modellen. Detta gör att det blir möjligt att applicera tolkningsmodellen till en bredare kategori av maskiner och geologiska miljöer utan omfattande kalibreringsarbete. I enlighet med detta har flera grundläggande forskningsprojekt genomförts vid avdelningen för Bergteknik vid Luleå tekniska universitet [4], [5].

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

För att fastställa tolkningsmodellerna måste både teoretiskt och experimentellt arbete genomföras. Det teoretiska arbetet kommer att fastställa sambandet mellan de borrtekniska parametrarna och bergets egenskaper. Detta ska baseras på förståelsen för borrmaskinen, den fysiska förståelsen för samverkan mellan borrverktyget och berget samt kunskapen om de mekaniska egenskaperna hos berget. Det experimentella arbetet ska undersöka och verifiera dessa samband. De grundläggande idéerna kan sammanfattas enligt Figur 2.



Figur 2. Tolkningsmodell för geologisk information och bergegenskaper från registrerade borrtekniska parametrar.

Geologisk beskrivning av sprängområdet

Aitik ligger längs en skjuvzon som kallas Kiruna-Ladoga zonen. Den sträcker sig från sjön Ladoga i Ryssland till Kiruna i Sverige [6]. Zonen utgör en gräns mellan den Kareliska plattan och den Svennofeniska plattan. I området kring Aitik gruvan består berget av metamorfa plutoniska, vulkaniska och sedimentära bergarter. De tillhör alla de prekambriska tidsåldern.

Mineralfyndigheten är innesluten av skjuvzoner, vilka även delar upp gruvan i den norra och den södra delen. Malmen stryker i nord-sydlig riktning och har en stupning på mellan 40° och 50° västerut. Mineralfyndigheten återfinns i gnejs. Man kan grovt dela upp malmzonen i två litologiska enheter: muscovitskiffer i den övre delen mot hängväggen och finkornig biotitgnejs och -skiffer i den lägre delen närmare liggvägen. Hängväggen består av amfibolgnejs som består varierarande av hornblände-bandad gnejs till kvarts-biotitgnejs. Kontakten mot malmzonen har blivit utsatt för kraftig skjuvning, vilket har reducerat dess hållfasthet betydligt. Bergarten som dominerar i liggväggen är diorit- och biotitgnejs. Närmare malmzonen kan man hitta en zon bestående av biotitgnejs med ett större innehåll av amfibol. Här är kontakten mot

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

malmzonen inte lika tydlig som för hängväggen. Den grovkorniga amfibol-epidot-fältspat-gnejs zonen kan ses som en ungefärlig malmzon. Hängväggens amfibolgnejs och liggväggens biotitgnejs kan vara väldigt lika varandra i både utseende och i geomekaniska egenskaper. Totalt finns det sju olika bergarter i Aitik. Deras respektive tryckhållfasthet presenteras i Tabell 1

Tabell 1. Tryckhållfasthet hos bergarter i Aitik [6].

Bergart	Schmidt hammar test [MPa]	Punktlast test [MPa]
Amfibolgnejs (HV)	72.0 ± 34.3	
Muskovitskiffer (MZ)	46.0 ± 13.8	111.8 ± 64.0
Pegmatit (MZ)	82.5	
Biotitskiffer (MZ)	75.0 ±2 4.8	
Biotitgnejs (MZ)	81.1 ± 21.0	133.8 ± 69.3
Biotitgnejs med amfibol (LV)		120.0 ± 46.0
Diorit (LV)	82.8 ± 28.5	124.8 ± 61.3

Tabell 1. visar att muskovitskiffern har den klart lägsta tryckhållfastheten samt att pegmatiten och dioriten har en något högre hållfasthet än de övriga. Detta borde visa sig i det data som registreras under borrningen.

I dagbrottet finns sex större sprickgrupper. De dominerande är den grupp som stryker nästan parallellt med malmkroppen och stupar mot väst samt de två sprickgrupper med brant stupande sprickor som stryker nordväst-sydöst och nära öst-väst. Flera av dessa sprickor har begränsad längd (1-2 meter) vilket gör berget relativt blockigt. Där finns även några signifikant längre sprickor som är vinkelräta mot malmkroppen och som har en brant stupning och stryker nästan öst-väst. Ytterligare en grupp längre sprickor finns i liggväggen. Dessa sprickor stryker sub-parallellt med malmkroppen och stupar mot väst. Dessa är förbundna med den geologiska variationen i liggväggen.

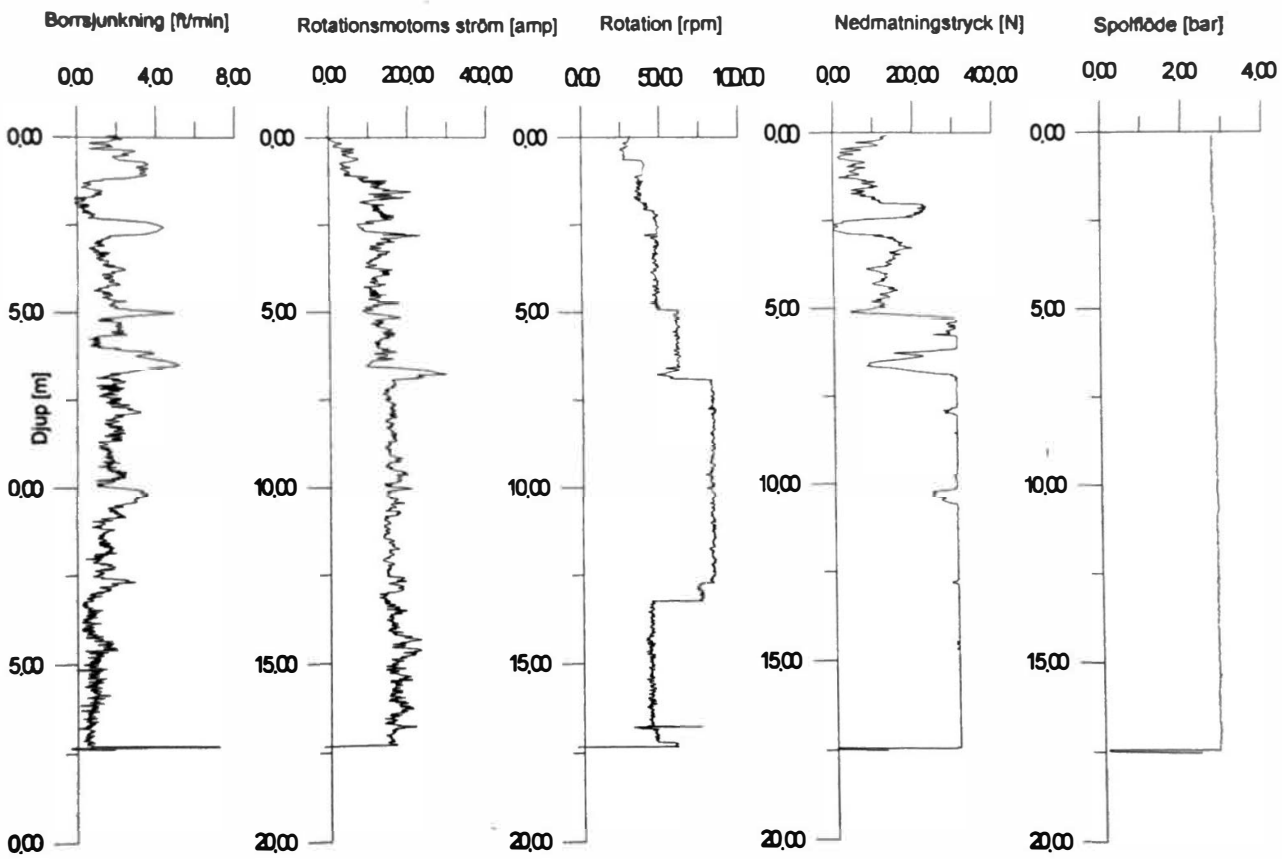
Geologisk information och bergegenskaper från MWD-tekniken

Informationen om geologi och bergarter som beskrivs ovan kan användas som indata för design av sprängning. Dock varierar både geologi och bergegenskaper från ställe till ställe. Det största problem som uppstår vid design av sprängning är avsaknaden av information om de lokala variationerna vad gäller bergets sprängegenskaper. I det pågående projektet skall detta problem lösas genom användandet av metoden mätning under borrning, MWD. Den viktigaste uppgiften vid användandet av MWD är därför att mäta parametrar som kan översättas till bergmekaniska egenskaper och geologiska strukturerna i salvan under tiden som man borrar. Borrhålsmönster och mängd sprängmedel kan sedan justeras i enlighet med de lokala egenskaperna så att effekten av sprängning kan optimeras. Sensorer monterade på borrutrustningen mäter borrtekniska parametrar hos borrsystemet. Variationer hos dessa parametrar speglar berget och dess variationer som förkastningar, sprickzoner, övergång till mjukare/hårdare bergmaterial etc.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Registrering av borrtekniska parametrar

I Aitikgruvan används tre borriggar för borrning av spränghål. En av dessa, en Bucyrus-Eire 49- RH, användes för MWD- projektet. På riggen finns en PLC (Programmable Logic Controller) som registrerar borrparametrarna. De parametrar som mäts är nedmatningstryck, rotation, borrsjunkning, spoltryck, rotationsmotorns ström, hållängd samt tid då mätning görs. Registrering från borrhål nummer 746-23 visas i Figur 3. För komprimering och filtrering av data installerades en bärbar PC i anslutning till PLCn. PC registrerar data från PLCn en gång varje sekund vilket ungefär motsvarar registrering en gång per centimeter. Data lagras och komprimeras på en hårddisk och kan sedan överföras till gruvkontoret för vidare bearbetning.



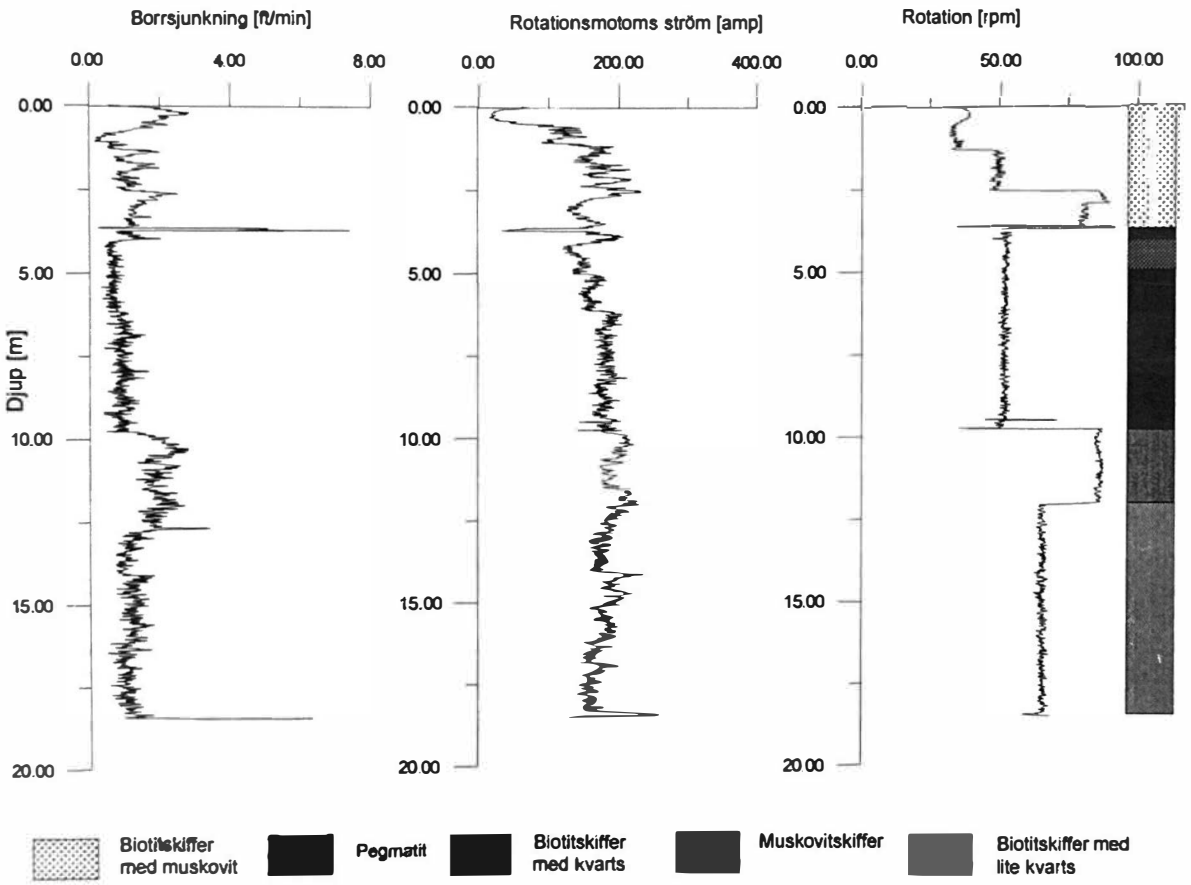
Figur 3. Borrtekniska parametrar registrerade för borrhål 746-23.

Korrelation mellan registrerade borrparametrar och bergarter.

I projektet användes i huvudsak data som registrerades vid borrning av två olika salvor i malmzonen i norra delen av gruvan. I detta område består geologin huvudsakligen av biotitskiffer och muskovitskiffer med tunna band av pegmatit. I området kan även finnas biotitgnejs.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

För att etablera samband mellan de registrerade borrparametrarna och de litologiska variationerna, borrades fem 17 meter långa kärnhål fördelade över de två salvorna. Varje kärnhål låg på avståndet 0,5 - 1 meter från ett borrat och registrerat sprängborrhål. Borrkärnorna karterades och resultatet jämfördes med de registrerade parametrarna så att förändringar i bergmaterialet i kärnorna och i data loggen kunde identifieras och korreleras. Figur 4 illustrerar ett av resultaten från ett registrerat hål, 746-59.



Figur 4. Korrelation mellan de borrtekniska parametrarna, dvs. borrsjunkning, rotations motorns ström och rotation, och resultatet från den geologiska karteringen för borrhål 746-59.

Figur 4 visar att borr parametrarna, speciellt rotationen och borrsjunkningen, visar olika responser när borrningen sker i hårdare (pegmatit och biotit skiffer) respektive mjukare (muskovit skiffer) berg.

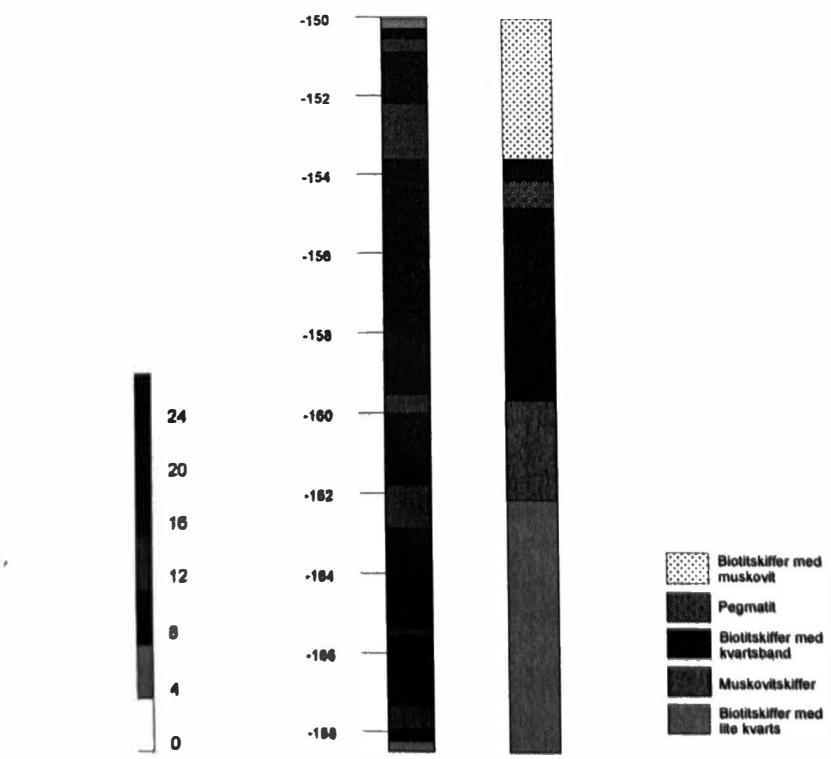
Efter karteringen av borrkärnorna gjordes olika provningar i laboratorium för att bestämma mekaniska egenskaper hos berget. Tryck- och draghållfasthet, E-modul samt Poissons tal har bestämts för borrkärnorna. Problem uppstod dock i försöken att korrelera dessa bergmekaniska egenskaper med de registrerade borrtekniska parametrarna. Det goda korrelationen mellan kärnkarteringen och de borrtekniska parametrarna samt en viss överensstämmelse med de mekaniska parametrarna inger dock en förhoppning om att fortsatt arbete kan ge goda resultat. Den förmodade orsaken

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

till den dåliga korrelationen mellan de borrtekniska parametrarna och de mekaniska egenskaperna hänför sig troligen till berget skiffrighet som har stor påverkan vid enaxliga tester. En annan orsak är de snabba variationerna även inom definierade bergartsklasser. Det senare visar på behovet av större antal prover. För att skapa bättre korrelation bör troligen triaxialtester och/eller hårdhetstester utföras på många fler kärnor.

Borrbarhetsparameter

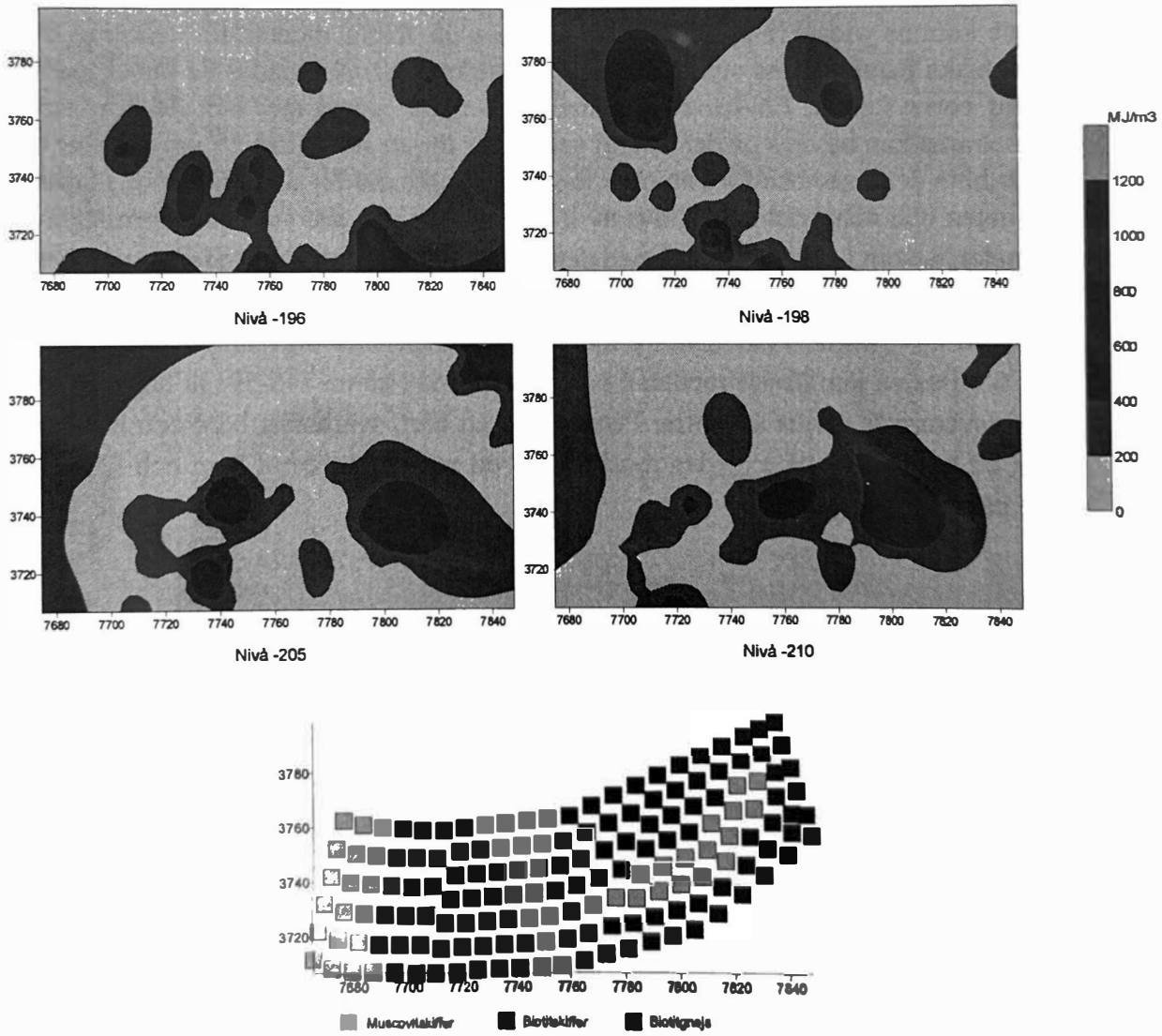
För att komma vidare i projektet och få fram en första modell för tolkning av de borrtekniska parametrarna och optimering av sprängning utnyttjades de kunskaper man har om borrsystemet. En korrelation mellan bergets egenskaper och de borrtekniska parametrarna kan baseras på den energi som åtgår för att slå sönder en volymenhet berg. För att hitta detta samband måste man formulera samband för den kraft som skapas vid borrningen och den kraft som krävs av berget för att den ska stå emot borrningen. En parameter, ε, som är proportionell med den energi det åtgår att slå sönder en volymenhet berg har tagits fram. ε beror på bergets egenskaper, geometrin hos borrstålet samt strukturen hos berget. Parametern ε kan sägas representera borrbarheten hos berget. I Figur 5. visas en jämförelse mellan ε och bergarterna i kärna 746-59. Ju högre värde på ε desto svårare är berget att borra. Pegmatit är ett hårt, svårborrat berg och har mycket riktigt ett högt värde på ε medan muskovit är ett mjukt, lättborrat berg och har ett lågt värde på ε.



Figur 5. Korrelation mellan ε och bergart för borrhål 746-59.

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Ytterligare jämförelser gjordes mellan ε och bergarter för fem olika salvor. Bergarterna i dessa salvor bestämdes via en kartering av borrkax utförd av geolog i Aitik. Detta Resultatet för salva 771 redovisas i Figur 6. Kartor över salvan är uppritad i fyra olika nivåer, 1, 3, 10 och 15 meter ner i hålet. Framförallt området med biotitgnejs kan identifieras vid nivåerna –196 och –198 men man kan även skilja på områden med den mjukare muskoviten och den något hårdare biotitskiffern vid dessa nivåer. En förklaring till att korrelationen försämras med djupet kan vara den oexakta karteringen och att fördelningen av bergarter förändras med djupet.



Figur 6. ε för olika djup i ***korrelation med bergarter för salva 771. Nedre delen av*** *figuren visar resultat av kax****provtagningar***

© 2000 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Avslutning

Hittills genomfört arbete visar att variationer i egenskaper hos bergmassan avslöjas med MWD. I nästa steg är avsikten att presentera borrbarhetskartor som underlag för sprängplanering i Aitikgruvan. I ett senare skede är för hoppningen att fortsätta utvecklingen av både tokningsmodeller och sprängmodeller genom direkt jämförelse mellan sprängningar med MWD-design och grävbarhet med lägesbestämning under lastningen med GPS-teknik. I detta utvecklingsarbete finns också möjlighet att utnyttja det system för bildanalys för bestämning av sprängningsresultatet som är under utveckling i Aitik [7]

Referenser

[1] Naarttijärvi, T., Projektförslag; MWD för sprängning i stora dagbrott. Intern rapport. Boliden Mineral, Boilden, Sverige. Maj 1997.

[2] Kou, S.-Q. and Rustan, A.. SAROBLAST, A Computer Program for Blast Design, Prediction of Fragment Size and Muckpile Profile. Forskningsrapport TULEA 1992:29, Luleå tekniska universitet, 1992.

[3] Cunningham, C., The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. *First Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting,* Holmberg, R. and Rustan, A. (ed.). Luleå tekniska universitet, 1983. Vol 2, pp 439-453.

[4] Lindqvist, P.-A. Rock fragmentation by indentation and disc cutting. Doktorsavhandling1982:20D, Luleå tekniska universitet, 1982.

[5] Kou, S.-Q., Some Basic Problems in Rock Breakage by Blasting and by Indentation. Doktorsavhandling 1995:180D, Luleå tekniska universitet, 1995.

[6] Sjöberg, J. Analysis of Large Scale Rock Slopes. Doktorsavhandling 1999:01, Luleå tekniska universitet, 1999.

[7] Wiik, P. Utvärdering av bildanalys i Aitik. Examensarbete. Avd. för Bergteknik, Luleå tekniska universitet, 1999.