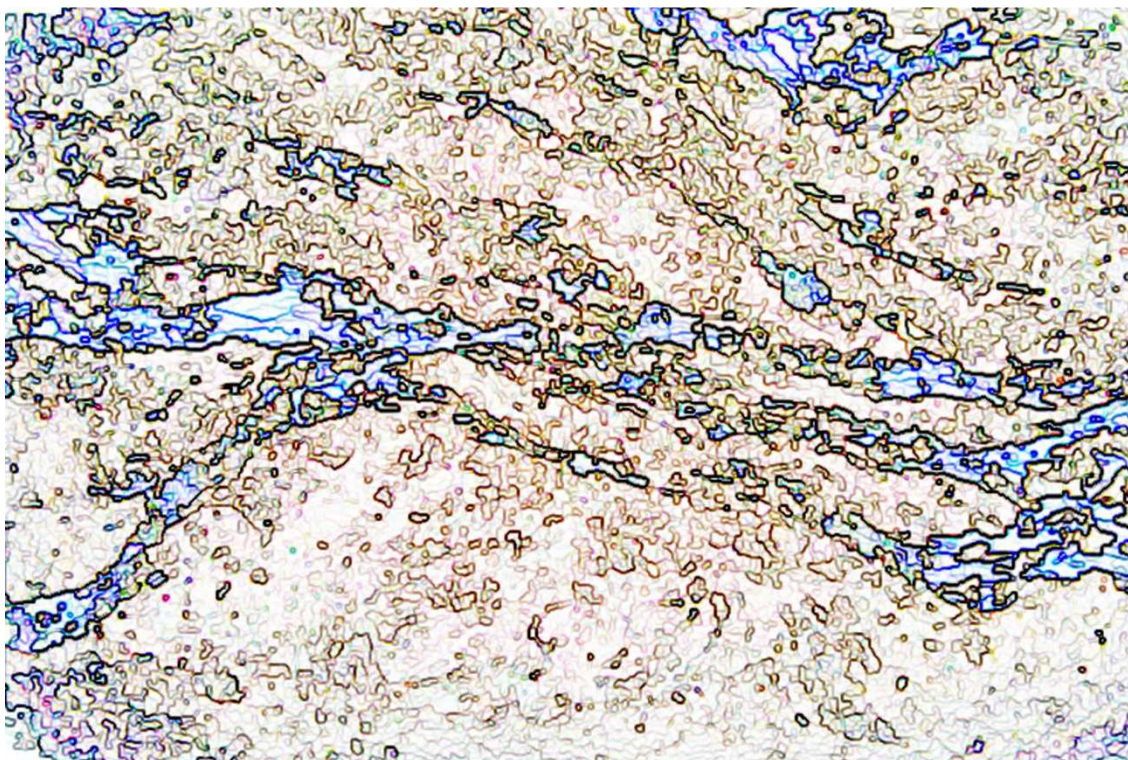


Petrografisk analysmetodik vid bergkvalitetsbedömningar

augusti 2010

Sven Lundqvist
Mattias Göransson

SGU-rapport: 2010:10



FoU-projekt 35025. Genomfört 2003–2005, presenterat mars 2006.

UTVECKLING AV PETROGRAFISK ANALYSMETODIK VID BERGKVALITETSBEDÖMNINGAR

Sven Lundqvist, Mattias Göransson

INLEDNING

Den geologiska vetenskapen har som alla vetenskaper en mångfald av termer för att beskriva olika fenomen. För geologen finns inom petrografen en ofantlig mängd termer att tillgå för att beskriva bergarten, som stöd för den slutliga, genetiska, tolkningen. För en person som i stället arbetar med bergmaterial som naturresurs finns ett behov av att kvantifiera och klassificera bergmaterialet för olika ändamål. Att använda sig av olika termer för dessa olika behov förefaller naturligt, men åtskillnaden är inte berättigad av en faktisk avsaknad av gemensamma beröringspunkter. Snarare visar detta att forskning och tillämpning inte har en gemensam historia. Att kvalitativt respektive kvantitativt beskriva ett material är den principiella skillnad som karaktäriserar dessa områden. Att det därför har funnits två system av termer har länge varit en tröskel som varit svår att komma över – två områden med otillfredsställande kontaktytor har inte varit en framkomlig väg. För SGU:s arbete med bergkvalitet, har därför den springande punkten och själva utgångspunkten för arbetet varit att använda sig av vetenskaplig terminologi, för att däri sträva efter att definiera och kvantifiera relevanta termer. Denna ambition har gällt både vid fältarbete och vid mikroskopering.

I SGU:s strävan att samhällsanpassa sina produkter och förena branschkunskap med traditionell geologi, har detta FoU-projekt initierats för att ytterligare utöka kunskaperna om vad som styr bergmassors tekniska egenskaper. Arbetet med bergkvalitet i befolkningstäta områden har vid SGU framgångsrikt bedrivits sedan 90-talet, där forskningen om bergmaterial, petrografi och styrande parametrar har varit en del av ett – huvudsakligen – nordiskt forskningsarbete. Vad som framför allt lett fram till frågeställningarna som utgör utgångspunkten i detta FoU-projekt, har varit behovet av att kunna detaljklassificera och kvantifiera olika strukturer och texturer i de metamorfa, kristallina bergarter som ofta används inom bergmaterialindustrin.

BAKGRUND

Tätortsgeologi, d.v.s. geologi relaterad till mänsklig aktivitet och infrastruktur, får allt större betydelse i samhället, nationellt såväl som internationellt. En omfattande satsning på bygg- och anläggningsverksamhet i form av exempelvis vägar, järnvägar, flygfält, tunnlar och

berggrum sker fortlöpande. Bergkvalitetsfrågor vad avser lokalisering och material- och resurshantering får ökad betydelse, av både ekonomiska och miljömässiga skäl. Kraven på kvalitetsklassning av berg för användning till olika ändamål ökar globalt, men kunskapen som krävs är fortfarande otillräcklig. Inom materialforskning ökar mikroskoperingens roll världen över, och kommersiella intressen har uppmärksammat detta.

Bergkvalitetsundersökningar vid SGU har utförts och pågår för tillfället huvudsakligen i tätbefolkade områden som Mälardalsregionen, Västra Götalandsregionen, Halland, Dalarna, Gävle, Sundsvall, Umeå, Örebro och Östergötland. Åtskilliga tekniska analyser, från ca 1500 lokaler, har utförts – m.a.o. föreligger ett stort informationsmaterial. Tekniska analyser är användarnas sätt att beskriva och förstå materialegenskaper. Utförandet av tekniska analyser är tidskrävande och kostsamt, men utgör en viktig del inom bygg- och anläggningsindustrin. Därför är det centralt att förstå bergmaterialets egenskaper bättre, för att i möjligaste mån undvika missbedömningar och felaktig hantering. Förenklingar och förtydliganden av materialkvaliteter kan innebära betydande kostnadsbesparingar för samhället. Det geologiska materialet är dock mycket heterogent och egenskapernas upphov kan sökas i petrografiska element, många påvisbara vid mikroskopering. Mikroskoperingens roll är att förklara olika tekniska analysresultat. Att öka kunskapen om petrografiska parametrar och metodik inom mikroskopering är därför en kärnfråga.

PROJEKTBESKRIVNING

Syfte

Syftet med föreliggande projekt är att öka kunskaperna och förbättra metodik vid bedömning och tolkning av bergarters mekaniska egenskaper, dels för användning inom SGU:s bergkvalitetsverksamhet och dels för en kvalitetshöjning av den geologiska information samhället använder sig av.

Mål

Målsättningen är att kunna definiera metoder och kritiska observationer vid petrografisk analys. Uppgiften är att med utgångspunkt från parametrar inom petrografi, jämföra och kunna analysera de olika testresultaten erhållna från kulkvarns- och Los Angeles-analys, d.v.s. förhållandet mellan bergmaterialets abrasiva respektive spröda egenskaper.

Målet är att kunna fördjupa kunskaperna om parametrarna undersökta i det tidigare genomförda FoU-projektet "Utvärdering och tolkning av petrografiska parametrar i relation till data från bergkvalitetsanalyser". Där detaljstuderades t.ex. kornstorlek, korngränser, kornstorleksheterogenitet, kornform, intern stress i kvarts och mineralogi, och även översiktligt

om strukturer. Målet är i detta projekt att också närmare studera de mer komplexa parametrarna glimmer, anisotropi, deformation och strukturer, metamorfos och omkristallisering, samt mineralfördelning.

Ytterligare ett mål är att utveckla principer och terminologi för att kunna beskriva strukturer i heterogena, gnejsiga bergarter.

Metodik

Bakgrund

Data och resultat från bergkvalitetsverksamhetens analyser har använts i projektet, i huvudsak från tekniska analyser (Kulkvarn, Los Angeles), mikroskopering och punkträkning (totalt 37 prover).

Kulkvarnsvärdet (K_k) är ett mått på bergets nötningssmotstånd (SS-EN 1097-9). Metoden används vid kravsättning av vägmateriäl (Vägverket 2004). Användandet av dubbdäck under vintersäsongen i Sverige innebär att de högratifierade vägnas slitlagerskikt slits kraftigt och följaktligen har ett behov av högpresterande, mot skavande nötning motståndskraftiga bergmateriel. Generellt har bergarter som granit, diabas, vulkanit och kvartsit bättre abrasionsegenskaper än sandsten, skiffer och amfibolit.

Los Angeles-värdet (LA), fraktion 10–14, är ett mått på bergartens sprödhet (SS-EN 1097-2). Metoden används vid kravsättning av vägmateriäl, (Vägverket 2004) och deklaration av järnvägsamakadamballast (Banverket, 2004). Generellt har basiska (kvartsfattiga) och vulkaniska bergarter bättre sprödhetsegenskaper än t.ex. pegmatit och grovkorniga, jämnkorniga granitoider.

Det råder ingen brist på parametrar att tillgå inom petrografi, för att beskriva en bergart vid mikroskopering. Terminologi som har utvecklats har styrts av behovet att tolka bergarten genetiskt, i vilken själva förekomsten, närvaron, av en sökt parameter signalerar en geologisk händelse, ett tryck-temperatur-förhållande eller ett visst ursprung. *Mängden* av förekomsten är underordnad och kan hanteras med enkla, beskrivande ord, utan att stora krav behöver ställas på noggrannhet eller användning av en viss gradindelning. Det kvalitativa iakttagandet dominerar således inom traditionell geologi.

Mikroskopet som analysverktyg är avancerat och kräver sin erfarenhet hos användaren, men den petrografiska terminologi som utvecklats bygger på optiska iakttagelser, precis som bergartsbedömningen som görs i fält. Vid både makroskopisk och mikroskopisk beskrivning noteras fenomen och görs subjektiva bedömningar av karaktären på bergarten. Vissa saker kan mätas, som t.ex. storlek på strökorn och lagertjocklek, medan andra låter sig beskrivas i

övergripande termer, som t.ex. textur och struktur. Karaktären på bergarten är sålunda det som lämnar störst utrymme för subjektiva bedömningar.

Bergarter i olika skalor är i detalj mycket (oändligt, om man så vill) komplexa, varför många termer försöker generalisera, försöker fånga upp det dominerande intrycket i hällen, stuffen eller slipet. Kornstorlek och jämnkornighet är exempel på detta. Det självklara förhållandet att det blir svårare att observera och mäta något, ju mindre det blir, gäller förstås i alla skalor, varför de största kornen får bli tongivande för bedömningen av kornstorlek och flera texturer. Vid tydliga skillnader mellan små och stora korn namnges förstås detta, som t.ex. porfyrisk.

Strukturer studeras bäst i de bergarter som har förutsättningar att utveckla dem, och mycket av strukturterminologin har därför sin grund i studiet av bergarter av lägre metamorf grad, med större mängd glimmer och tillräckligt finkorniga. Strukturterminologin är sålunda rikt utvecklad för detaljbeskrivning av foliation och *cleavage* i glimmerrikare bergarter, medan en sparsammare – och mer övergripande – termflora används för grövre, glimmerfattigare bergarter. I exempelvis granitoider beskriver man därför oftare strukturer genom att notera omkristallisering av korn, längd-bredd-förhållandet av korn, hur aggregaten uppträder, närvaron av band (mineralogiska, deformationsstråk etc.). Med andra ord är terminologin för kvarts-fältspatmineralogin mer utvecklad för djupbergarter. Att dessutom strukturer utvecklas mer heterogent (i mikroskala) i glimmerfattiga bergarter, gör det svårare att i sådana definiera olika strukturer.

Vid sidan av ovan nämnda förhållanden behöver man inom bergmaterialbranschen indelningar och bedömningsgrunder, som enkelt kan utföras och enkelt kan förstås. Bergartsindelning utifrån tre klasser, strukturindelning utifrån två klasser och mikroskopering med glimmer- respektive kvartshalt som enda intresse är olika exempel på en pragmatisk indelning som fyller grundbehov av klassificering, som fungerar i det dagliga arbetet i branschen, men som också är otillfredsställande genom sin trubbighet. Dessutom utförs många mätningar och bedömningar av petrografiska parametrar utifrån behovet att utröna orsakerna till olika styrkeegenskaper. Både egenskaper inom produktion, som t.ex. *crusher performance* och *drillability*, och inom slutanvändning, som t.ex. tryckhållfasthet och motståndskraft mot nötning, har styrt undersökningar. En stark drivkraft har varit att genom olika avancerade beräkningsmodeller komma fram till dels vad som kontrollerar egenskaperna ifråga och att dels genom beräkningar kunna förutsäga hur en bergart kommer att uppföra sig. Av den anledningen har ofta beräkningar inom materialforskningen om bergarter utvecklats till omfattande matematiska kalkyler. En önskan att kunna beakta alla parametrar för att förutsäga beteendet, och därmed hitta bergartens ”hemliga formel” har legat bakom flera beräkningsmodeller – en önskan att kunna räkna ut ett analysvärde i stället för att faktiskt utföra den, ofta, dyrbara analysen.

Det har gjorts många försök att beräkna texturer och strukturer. Anisotropi och deformationsgrad har ofta blivit föremål för närmare studier, och även kornstorleksfördelning. Många av dessa försök och beräkningar har legat inom intresset för tolkning av bergarten, där

beräkningen kan säga något om den geologiska utvecklingen, men även om dess styrkeegenskaper. Gemensamt för många sådana beräkningar (foliationsindex, texturkoefficient, *fabric points*) är att de inkluderar flera parametrar samtidigt och är tidskrävande att utföra (Tsidzi 1986, Ersoy & Waller 1995, Walsh 2003). De senaste årens utveckling av digital bildanalys, databearbetning och mikroskopering har givit näring åt en ny mätteknisk verksamhet (Åkesson & Lindqvist 2001, Åkesson 2004), där man numeriskt kan erhålla goda korrelationer mellan olika petrografiska element och analysvärden, på ett sätt som inte var möjligt tidigare.

Undersökningar på forskarnivå om tekniska egenskaper i bergmaterial fokuserar sålunda oftare på att utveckla själva mätningssproceduren snarare än terminologin. Sammanfattningsvis så är kvantifieringen central för användare av bergmaterial – både för teknikern och för forskaren. Kvantifieringen, klassningen, som huvudmoment inom praktisk användning har hittills varit en skiljelinje mot behoven att beskriva bergarter inom geologi.

Definitioner

Samtliga exempel ovan visar en heterogen bild, där flera områden har svårt att mötas, men som därför också fungerar som en behovskarta. Eftersom föreliggande FoU-projekt utgår från mikroskopering kan behoven för detta FoU-projekt definieras utifrån nämnda förhållanden, i denna syntes:

- Den petrografiska beskrivningen av de utvalda bergarterna ska utgå från en kvalitativ, petrografisk terminologi, där detaljbeskrivningar av mikrostrukturer ska vara basen.
- Eftersom deformation, struktur och anisotropi är så pass komplext att beskriva, ska en ambition vara att dela upp dessa i sina beståndsdelar; de petrografiska, minsta element som bygger upp de större mönstren.
- Bedömningarna ska inkludera karaktärer som beskriver både helheten och detaljer.
- I stället för att söka generaliserande förhållanden, söka det som definierar variationerna. Huvudregeln är att utgå från att det som kan observeras ska kunna beskrivas.
- Varje karaktär och parameter ska kvantifieras eller graderas om så är möjligt och där den ytmässiga fördelningen eller variationen i slipet ska definieras. Denna treenighet blir i projektet grunden i sättet att beskriva de petrografiska elementen: Fenomen–grad–variation.
- Speciellt fokus kommer att läggas på glimmer och beskrivningen av dess olika skepnader.
- Försök kommer att göras för att hitta fungerande termer och bedömningsgrunder för strukturer i grövre bergarter.
- Försök kommer att göras för att hitta fungerande termer och bedömningsgrunder för olika heterogeniteter – mineralogiska, strukturella, kornstorleksmässiga etc.
- En strävan att komma till uttryck ska göras för parametrarna som 1-karaktärsparametrar, till skillnad från inklusiva begrepp såsom t.ex. foliationsindex. Sålunda kommer inga omfattande matematiska beräkningar att behövas för de petrografiska beskrivningarna.

Det förra FoU-projektet kunde utnyttja bergkvalitetsdatabasen med befintliga analysvärden och mätdata i sin helhet, där många delgrupper kunde väljas och korreleras mot mätdata. Det stora totalantalet tillät delgrupper som, trots snäva urvalskriterier, i sin tur var stora nog för att vara statistiskt hållbara. Statistiken byggde på plottning av unika karaktärer.

Detta FoU-projekt är som tidigare nämnts en fördjupning av det tidigare FoU-projektet, men flera principiella skillnader i förutsättningarna gör dem helt olika till sin uppbyggnad.

- Detta FoU-projekt bygger på nyinläggning av mikroskoperingsdata.
- Projektet utnyttjar den mängd prover som har hunnits med att nybeskrivas, ca en tiondel av föregående FoU-projekts provantal.
- Bergarterna som här redovisas är granitoider och sedimentådergnejser.
- Utvalda prover uppvisar en tydlig parallellorientering och deformationsstruktur.
- Utvalda prover innehåller relativt höga glimmerhalter.
- Fler parametrar studeras.
- Ambitionen är att kvantifiera samtliga studerade parametrar.

Statistiskt får man närma sig och hantera materialet på ett annat sätt än vad som gjordes i det föregående FoU-projektet. Antalet prover är i detta projekt för lågt för att, utifrån olika isolerade, petrografiska kriterier, söka ut delgrupper som tillåter statistiskt hållbara beräkningar. Följande metoder har då använts i projektet:

- Mätdata behandlas genom att använda samtliga prover och korrelera dem mot tekniska analysdata.
- Dock kan man dela in materialet i grupper – men då spegelvänt och utgående från de tekniska analyserna. För kulkvarnsvärde har tre klasser definierats för att kunna jämföra mikroskoperingens data gruppvis i tekniska aspekter. Klass 1 innehåller prover med K_k -värden $<12\%$, klass 2 $12\text{--}20\%$ och klass 3 $>20\%$.
- Los Angeles-värdena uppvisar inte motsvarande stora spridning, varför ingen indelning i LA-klasser av dessa har gjorts.

Att hantera data gruppvis ger möjlighet att åskådliggöra generella beteenden, gruppvisa skillnader och även trender inom grupper. Dessutom tillåter gruppvisa medelvärden för olika petrografiska parametrar, att påverkan från de individuella skillnaderna proverna emellan och påverkan från andra parametrar underordnas. Även om variationerna därför kan vara stora inom en grupp, här K_k -klass, blir skillnaden i medelvärde mellan klasserna – medelvärdetrenden – den talande parametern. På detta sätt har de olika petrografiska elementen studerats. Nedan under respektive undersökt parameter, beskrivs metodiken specifikt för dessa.

RESULTAT

Bergart

Bergartsskillnader är få, men fler granitoider återfinns i K_k -klass 1, och fler sedimentådergnejser återfinns i K_k -klass 3.

Kornstorleksanalys

Vid mätning av kornstorlek har så långt det är möjligt variationerna i kornstorleksfördelningen beskrivits. Total kornstorlek, dominerande kornstorlek, underordnade fraktioner som uppträder lokalt som strökorn, stråkviss, fläckviss etc. har angivits.

Kornstorlek har inte varit ett kriterium för själva urvalet av prover (se Metodik). Skillnader finns dock givetvis avseende bergarternas gry. De minsta kornstorlekarna, och fler sådana, återfinns i klass 1. Dessutom visar sig i synnerhet differensen mellan det för provets minsta (K-min) respektive största (K-max) kornstorlek vara väsentlig för t.ex. en bergarts sprödhetsegenskaper (se figur 1).

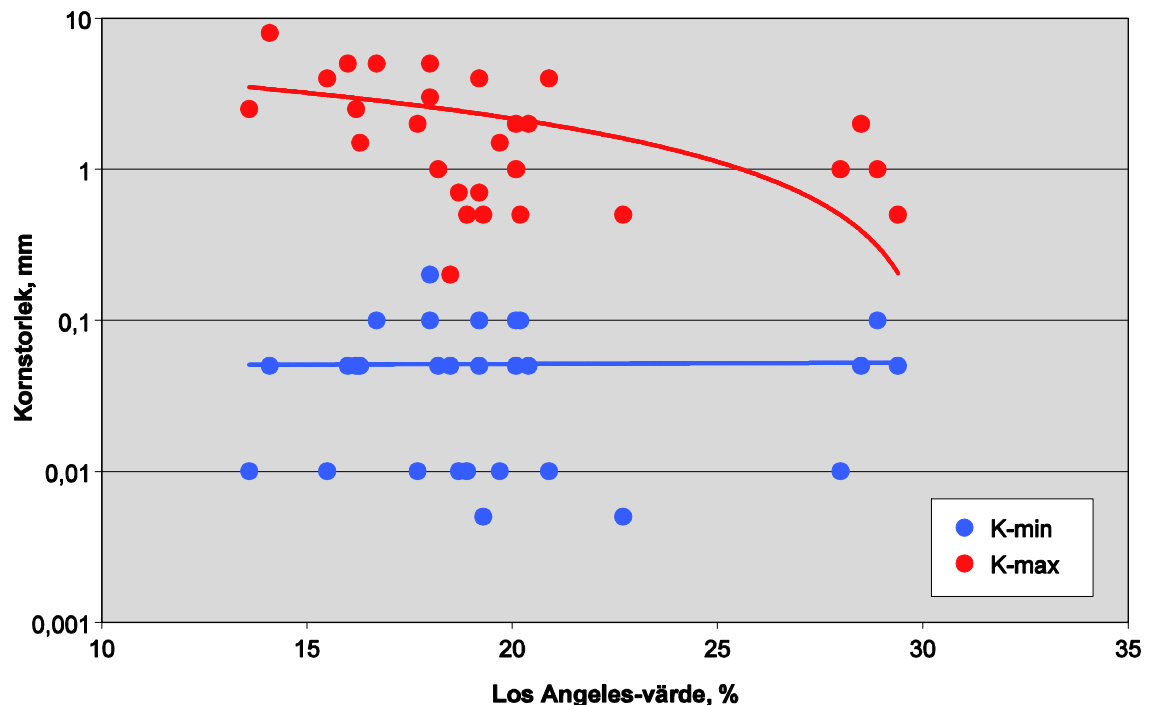


Fig. 1. Diagram över samtliga undersökta bergartsprovs sprödhetsegenskaper (Los Angelesvärde) och mineralens kornstorlek. K-min är provets minsta kornstorlek och K-max är provets största kornstorlek.

En överblick av ”ojämnkorniga” (stor differens på Y-axeln mellan K-min och K-max) bergarter råder till vänster i diagrammet vilket motsvaras av låga LA-värden (= goda sprödhetsegenskaper).

En intressant iakttagelse är att trendlinjen för K-maxvärdena sjunker med ökat LA-värde. Differensens storlek i provpopulationen antas vara förstärkt av deformation (partiell kornstorleksförminskning) och antas korrelera positivt med ökad grad av deformation. Uttryckt annorlunda missgynnas sprödhetsegenskaperna av en ökad jämnkornighet, vilket är ett exempel på att ordnade eller regelbundna tillstånd sänker hållfastheten i material. De bästa Los Angeles-värdena uppvisas av de prov som är mycket ojämnkorniga, alltså har både finkornigt matrix och stora strökorn. Av ovanstående resonemang följer att K-max vid närvaro av små K-min korrelerar negativt mot försämrade sprödhetsegenskaper.

Även kulkvarnsvärdena korrelerar på samma sätt. Proverna i K_k-klass 1 är mer ojämnkorniga än de i klass 2 och 3, vilket då stärker parameterens allmängiltighet för styrkeegenskaper.

Glimmerhalt

Glimmerhalten (som i detta projekt även låter inkludera klorit) varierar kraftigt inom de tre kulkvarnssklasserna (se figur 2).

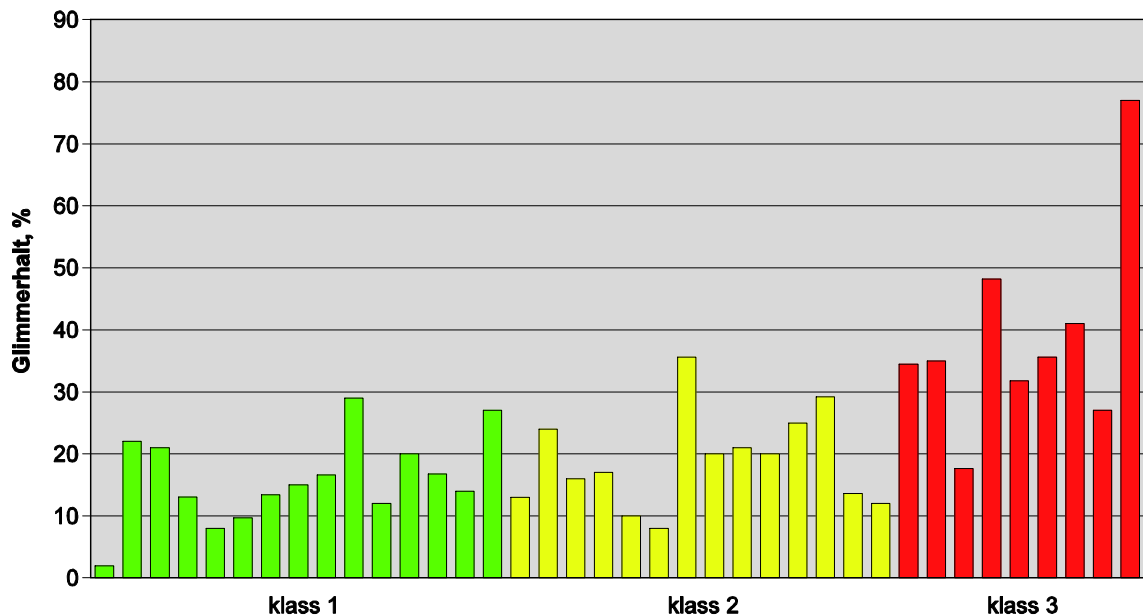


Fig. 2. Diagram redovisande samtliga undersökta bergartsprovs glimmerhalter i jämförelse med de tre tekniska klasserna 1, 2 och 3 (där Klass 1 innehåller prover med K_k-värden <12 %, klass 2 12–20 % och klass 3 >20 %).

Med försämrat K_k -värde ökar den genomsnittliga, klassvisa glimmerhalten. Medelvärdet för klassernas glimmerhalt stiger kraftigt från 16 % för klass 1, vidare 19 % för klass 2 till slutligen 39 % för klass 3. Endast ett av proverna från klass 3 har en lägre glimmerhalt än 25 % vilket är Banverkets övre kravgräns för järnvägsmakadamballast (Banverket 2004) (se figur 3).

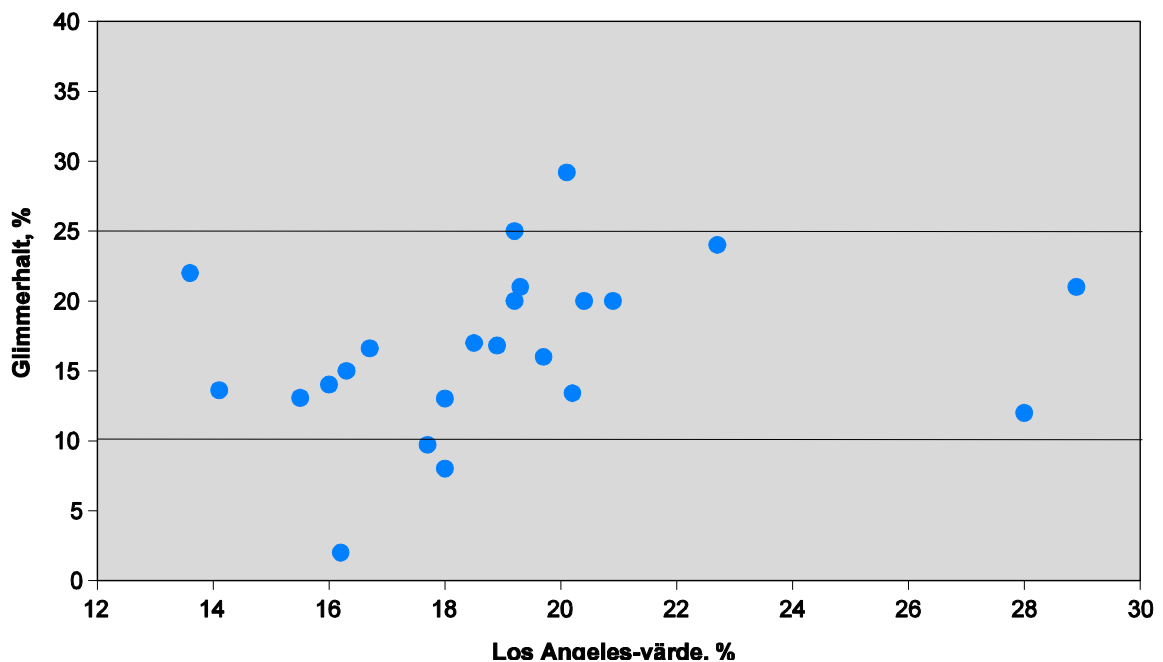


Fig. 3. Diagram över samtliga undersökta bergartsprovs sprödhetsegenskaper (Los Angelesvärde) i jämförelse med deras glimmerhalter. De flesta av de undersökta proverna klarar Banverkets krav på lägre glimmerhalt än 25 % som kan godtas efter en geologs bedömning av glimmermineralens orientering i bergarten (Banverket 2004). Relativt få prover (ca 8 %) klarar Banverkets krav på lägre glimmerhalt än 10 %.

Anmärkningsvärt är att det finns en stor spridning i glimmerhalt inom varje K_k -klass, vilket visar att glimmerhalt är en vanskelig bedömningsgrund för bergkvalitet. Berg med utmärkta tekniska egenskaper kan sålunda innehålla mycket glimmer, och visar att de slutliga tekniska egenskaperna styrs av kombinationen av glimmermängden med andra komponenter. Glimmer kan sålunda ha både en stark isolerad påverkan på en bergarts styrkeegenskaper då halten överstiger för bergarten kritiska värden, och även en stark kombinerad påverkan.

Kornstorleksförminskning, omkristallisering

Ett slags mått på bevarad deformationsmängd är graden av omkristallisering i betydelsen kornstorleksförminskning, som fortfarande är synlig. Här observerades hur större korn har omkristalliserats till flera mindre. För att inte råka beskriva primära aggregat av något mineral, har endast korn som tydligt uppdelats tagits med. I denna bedömning har såväl yttre kornform och allmänintryck som relationen till omgivande mineral tagits med. Exempelvis kan porfyroklaster ge en fingervisning om de större kornen i slipet. Vidare kan glimmer och deformationsstråk som sveper runt aggregat markera yttre gränsen för tidigare stora korn, som

nu är uppdelade. Graden av omkristallisering kategoriserades enligt: 1 = ej noterad till mycket liten, 2 = liten, 3 = medel, 4 = hög och 5 = mycket hög.

Omkristalliseringen ökar totalt med bättre kulkvarnsvärden (se figur 4) och ännu tydligare på klassnivå. Detta är även bergartsbetingat, där sedimentådergnejser uppvisar lägre grad av omkristallisering (alltså synlig kornstorleksförminskning) än granitoider. Hälften av alla prover från K_k -klass 1 är bedömda som graden 5, mycket hög, av omkristallisering. Noterbart är att samtliga prover är mer eller mindre omkristalliserade, även de mer välbevarade bergarterna.

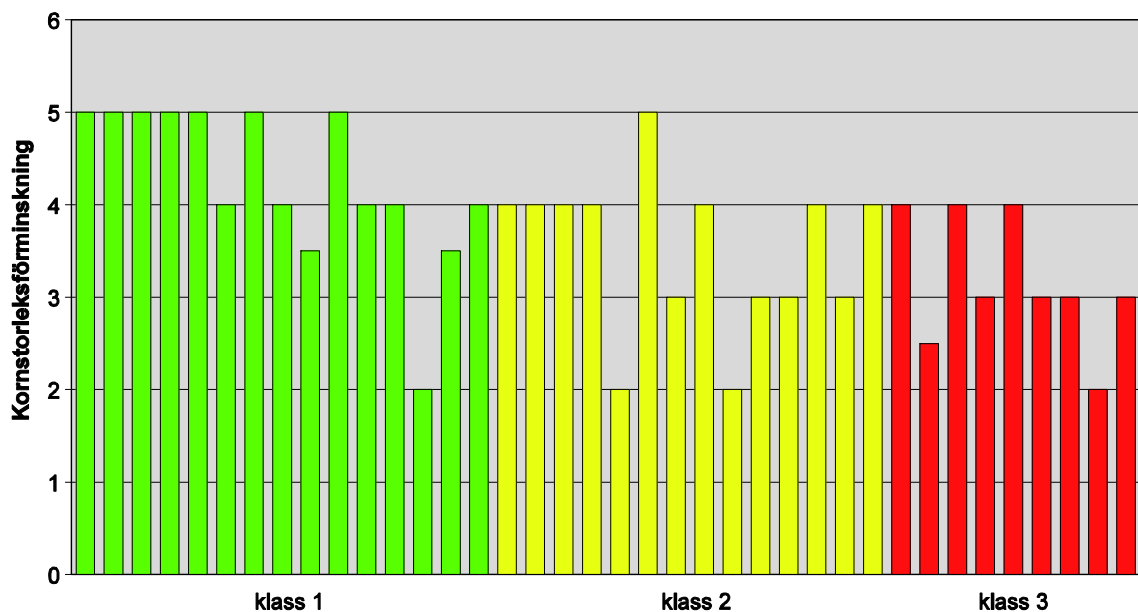


Fig. 4. Diagram redovisande graden av omkristallisering (kornstorleksförminskning) i jämförelse med de tre tekniska klasserna 1, 2 och 3 för samtliga prover. Graden av omkristallisering kategoriserades enligt: 1 = ej noterad till mycket liten, 2 = liten, 3 = medel, 4 = hög och 5 = mycket hög.

Mineralfördelning, heterogenitet

Mineralfördelningen är en parameter som har använts för ge en bild av slipet och bergarten som helhet. Den är ett uttryck för hur väl väldispergerade mineralkornen uppträder, var för sig och i förhållande till varandra. De mineral som har använts vid bedömningen är de som förekommer i sådan mängd att de betraktas som huvudmineral, vilket alltså kan skilja sig mellan proven. I första hand har fördelningen av glimmer, kvarts, kalifältspat och plagioklas bedömts, men i förekommande fall har även fördelningen av epidot, hornblände, cordierit, sillimanit, granat och titanit noterats. Graden av heterogen mineralfördelning kategoriserades enligt: 1 = mycket homogen, 2 = homogen, 3 = något heterogen, 4 = heterogen och 5 = mycket heterogen.

Graden av heterogen mineralfördelning ökar med ökande kvalitet (lägre K_k -värde) (se figur 5). Medelvärde för klassernas heterogenitet sjunker från 4,1 för klass 1, till 3,8 för klass 2 till

slutligen 3,6 för klass 3. Detta är i viss mån bergartsbetingat, där granitoider uppvisar en mer entydigt heterogen mineralfördelning, medan ytbergarterna uppvisar stora individuella skillnader, delvis beroende på olika metamorfosgrad. De genomgående, relativt höga medelvärdena visar att proverna är utvalda från bergarter med tämligen likartad geologisk genes och karaktär (varken kalkstenar, unga sedimentbergarter eller recenta lavar etc.). Den relativt lilla skillnaden mellan medelvärdena visar att heterogenitet är en faktor, som står i tydlig samverkandeställning med andra parametrar.

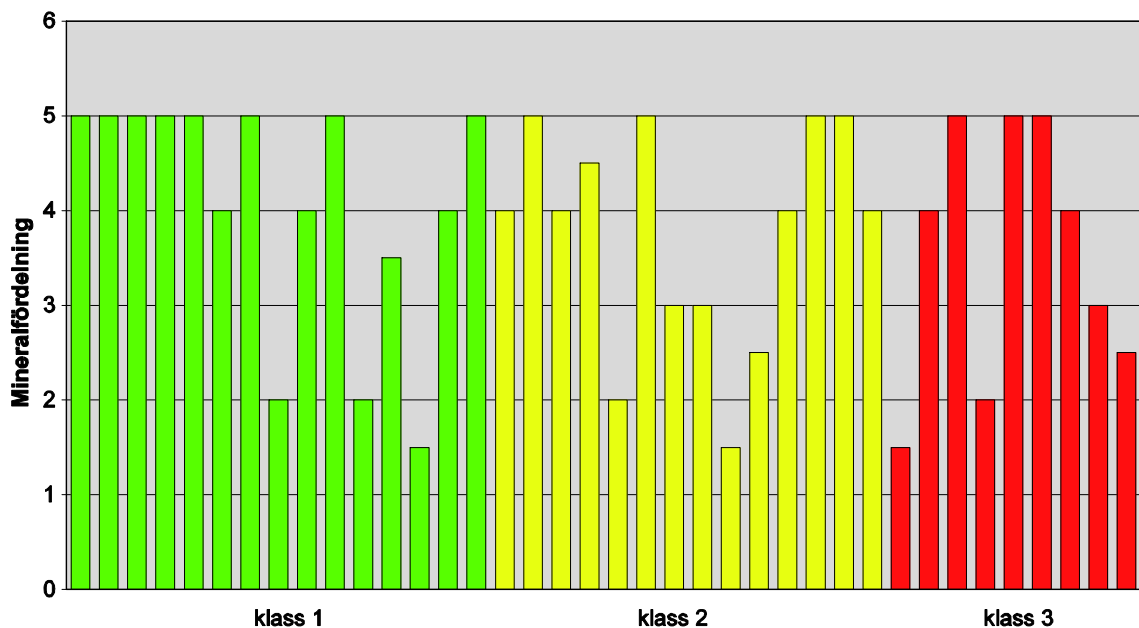


Fig. 5. Diagram redovisande mineralfördelningen (hur väldispergerade mineralkornen uppträder) i jämförelse med de tre tekniska klasserna 1, 2 och 3 för samtliga prover. Graden av heterogen mineralfördelning kategoriserades enligt: 1 = mycket homogen, 2 = homogen, 3 = något heterogen, 4 = heterogen och 5 = mycket heterogen.

Kompositionella band

Fördelningen av mineral i kompositionella band är inte någon starkt utvecklad parameter i undersökta bergarter. En skaleffekt uppträder dock i slip där aggregat genom plastisk deformation är utdragna i sådan grad att det i mikroskala uppträder som mineralogiska band. Mikroådring förstärker detta.

I undersökningen har förekomst av kompositionella band noterats, vilka mineral som definierar dem och till vilken grad de är utvecklade. Band rikare eller fattigare på olika mineral förekommer i bergarter inom alla tre klasser, men eventuellt finns en trend att fler prov finns representerade i klass 3, där många sedimentådergnejser återfinns. För de utvalda bergarterna är sålunda inte kompositionella band en tillräckligt tydligt utvecklad parameter för att hantera på mikroskala.

Strukturer

Allmänt

Strukturen i en bergart är resultatet av mineralens samverkan i ordnade gruppbetenden, som bildar olika karakteristiska mönster och inhomogeniteter, ofta mätbara i rummet.

Flera olika komponenter, petrografiska element, bygger i varierande grad upp en struktur, som vid en geologisk beskrivning namnges med en övergripande term, t.ex. ådrad, folierad, stänglig. Sådana termer kompletteras ofta med gradbeskrivande ord såsom kraftigt, svagt etc., och med variationsbeskrivande ord såsom penetrativt, domänvist etc. Av ovan nämnda förhållande, att varje struktur är en flerkomponentsparameter, blir felet för stort om man använder sig av övergripande termer. För att definiera struktur och kunna korrelera mot tekniska analyser – och på så sätt utröna upphovet till de tekniska egenskaperna – är det därför nödvändigt att definiera de petrografiska elementen som är närvarande i en bergart.

Definitioner

Olika element låter sig definieras olika lätt, där graden inte alltid är det relevanta, eller ens möjliga, att definiera. Däremot kan variationen, den ytmässiga fördelningen eller helt enkelt mängden, beskrivas. Här har en femgradig skala använts för variation: 1 = mycket lite (vilket inkluderar beskrivningar som lokalt, i enstaka korn, som enstaka stråk, få, i små korn, långa kornkanter), 2 = lite (vilket inkluderar beskrivningar som glesa, fläckvis, ibland, små domäner), 3 = medel (vilket inkluderar beskrivningar som allmänt förekommande, vanligt, domänvis, som linser), 4 = mycket (vilket inkluderar beskrivningar som täta, jämnt utvecklad, växelvis dominerande, tydligt) och 5 = mycket hög (vilket inkluderar beskrivningar som extremt, dominerande, totalt, 100 %). Genom att klassificera de olika beskrivande orden för ytmässig fördelning, har också fenomenen viktats – siffran anger därmed att en bedömning har gjorts av hur stor påverkan variationen har.

De grundläggande elementen som bygger upp en parallellorientering – foliation eller lineation – i en bergart, är:

Mineralorientering. Elongerade korn som är ordnade och med sin längdaxel orienterade i en gemensam riktning. Varje mineral som uppvisar mineralorientering har noterats.

Omfattningen, d.v.s. hur stor del av det totala antalet korn av respektive mineral, som det undersökta mineralet utgör, har bedömts enligt en tregradig skala: 1 = till liten del, 2 = delvis/till viss del och 3 = till stor del/dominerande.

Utdragna aggregat. Plastisk deformation medför en omkristallisering och en anpassning i rummet där större korn delas upp i mindre och arrangeras i strängar längs extensionsriktningen. De enskilda kornen behöver inte uppvisa mineralorientering. Varje mineral som uppträder i utdragna aggregat har noterats. Omfattningen, d.v.s. hur stor del av det totala antalet korn av respektive mineral, som det undersökta mineralet utgör, har bedömts

enligt en tregradig skala: 1 = till liten del, 2 = delvis/till viss del och 3 = till stor del/dominerande.

Ådror. Mängd har bedömts.

Mylonitiska stråk. Här används ordet mylonitisk i betydelsen tydligt plastiskt deformerad, med en kraftig kornstorleksförminskning och utveckling av utdragna aggregat som följd. Dess förekomst har noterats.

Glidytor. Är i proverna läkta. Förekomst av detta har noterats.

Kornstorleksskillnader (beskrivet ovan).

Kompositionella band (beskrivet ovan).

Övriga. Det förekommer diverse heterogeniteter som kan uppträda parallellorienterat, såsom t.ex. domäner av hög förekomst av mikrosprickor, stark sericitomvandling runt större sprickor, läkta större sprickor.

Avgörande för bergkvaliteten är inte bara typen av parallellorienteringselement enligt ovan, utan i hög grad även hur de uppträder och ser ut. De indelningsgrunder som kan användas för att beskriva formen, morfologin, hos elementen är dels av allmän karaktär för bergarter (Passchier & Trouw 1998, Spry 1969) och dels går det att utnyttja den utvecklade terminologin och indelningsgrunderna som finns tillgå för att beskriva *cleavage* och strukturer i skiffrar (Powell 1979, Walsh 2003). Morfologiskt och uppträdandemässigt har strukturelementen i bergarterna i detta projekt bedömts i följande kategorier:

Form och uppträdande längs parallellorienteringen. Beskrivning görs av strukturen om den är utvecklad som avbruten, sammanhängande, veckad/krusveckad, rak eller oregelbunden.

Form och uppträdande vinkelrätt parallellorienteringen. Beskrivning görs av strukturen om den är utvecklad som kontinuerlig, domänvis, rakt parallell, oregelbundet parallell, anastomoserande, med diskreta övergångar eller med gradvisa övergångar.

Cleavage domains. Försök att mäta tjocklek i mm görs. Beståndsdelarna beskrivs och vad som karaktäriserar dessa domäner.

Microolithons. Försök att mäta tjocklek i mm görs. Beståndsdelarna beskrivs och vad som karaktäriserar dessa domäner.

Spacing avstånd. Försök att mäta avståndet mellan *cleavage domains* och *microolithons* i mm görs.

Mineralorientering

Nötningsegenskaperna påverkas tydligt av hur mineralorienteringen är utvecklad, där både mineralogi och utvecklingsgrad samverkar. Kvarts och glimmer uppvisar mineralorientering i lika hög grad i de tre K_k -klasserna. Kalifältpat och plagioklas är tydligare mineralorienterade i klass 1 och 2 än i klass 3. Det har observerats att även de accessoriska mineralen är mineralorienterade i klass 1 och 2.

Utdragna aggregat

Denna parameter korrelerar mot nötningsegenskaperna på samma sätt som mineralorientering, på så sätt att utdragna aggregat är tydligare utvecklade i K_k -klass 1 och 2.

Ådror

En ådergnejsomvandlad bergart har en strukturstorlek som inte slipskalan tillåter att redovisa, men det förekommer ändå mikroådror som beskrivits. Mängden av dessa har varit så låg att inte korrelation mot tekniska analyser kunnat göras, men parametern i sig har sekundärt inkorporerats i andra parametrar, genom att ådror ofta uppvisar kornstorlekskillnader mot grundmassan, och mineralogiskt kan ses som ett kvartsrikt band. Dessutom är det på slipskala ibland inte möjligt att avgöra om det är frågan om en ådra eller en del av ett starkt utdraget aggregat. Flera ådror har av den anledningen tagits med i beskrivningen av utdragna aggregat.

Mylonitiska stråk och glidytor

För få prover innehåller mylonitiska stråk och glidytor för att det ska vara meningsfullt att bedöma mängden och fördelningen av dessa parameter. Korrelation kommer då inte att nås med tekniska analysdata, men parametrarna i sig har sekundärt inkorporerats i andra parametrar, exempelvis kornstorleksfördelning, utdragna aggregat och omkristallisering. Därför har dessa två parametrar noterats som närvarande eller inte. Statistiskt hanteras då inte graden av fenomenen ifråga, utan andelen prover som innehåller dem.

Figur 6 visar i respektive K_k -klass procentandelen av prover där mylonitiska stråk har påvisats. Deformation som uppträder som tunna, mylonitiska stråk förbättrar ofta nötningmotståndet i en bergart, vilket diagrammet tydligt visar. Det är därför fler prover med mylonitiska stråk i klass 1, med sjunkande trend mot klass 3. Det är dock ingen garanti att en bergart med mylonitiska stråk är tekniskt bra. Detta kan uppvägas av förekomst av sammanhängande stråk med glimmer, framför allt om glimmern är orienterad, grovkornig och sekundärt tillväxt. Sådana stråk uppträder ofta tillsammans med kornförgrovd, stressfri kvarts.

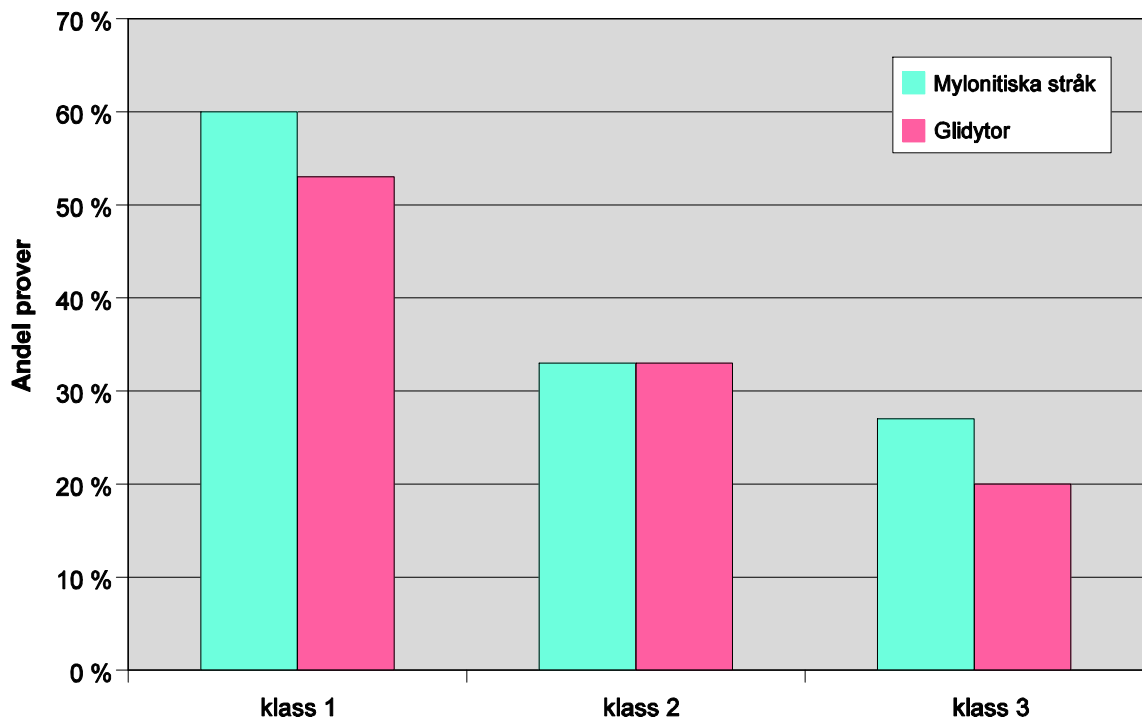


Fig. 6. Diagram redovisande strukturmedelvärden (mylonitiska stråk respektive glidytor) för respektive teknisk klass. Det strukturella medelvärdet är uträknat som produkten av variationen och omfattningen (se vidare i texten) av det specifika elementet.

De mylonitiska stråken som dock noterats, utgörs i dessa fall av kalifältspat och mycket finfördelad glimmer. Avgörande för bergartens styrka är därför graden av kornförgrovning och statisk omkristallisering. Det har alltså visat sig att denna återhämtningsprocess motverkar de förbättrande parametrar som uppkommit tack vare deformationen. Geologiskt är det med andra ord inte bergmekaniskt gynnsamt med sen plastisk deformation alternativt retrograd återhämtning (statisk omkristallisering) under för höga temperaturer. Detta har även tidigare noterats i det föregående FoU-projektet.

Övriga

Det låga antalet av de övriga parallellt orienterade elementen har inte kunnat korreleras mot tekniska analysdata.

Morfologi

Parallella element. Graden av utveckling av raka och parallellt arrangerade strukturelement ökar med sämre K_k -klass.

Oregelbundna element. Graden av utveckling av oregelbundet arrangerade strukturelement ökar med bättre K_k -klass. Detta förhållande gäller vid oregelbundenhet som är utvecklad både längs med parallellorienteringen och vinkelrätt mot den (se figur 7).

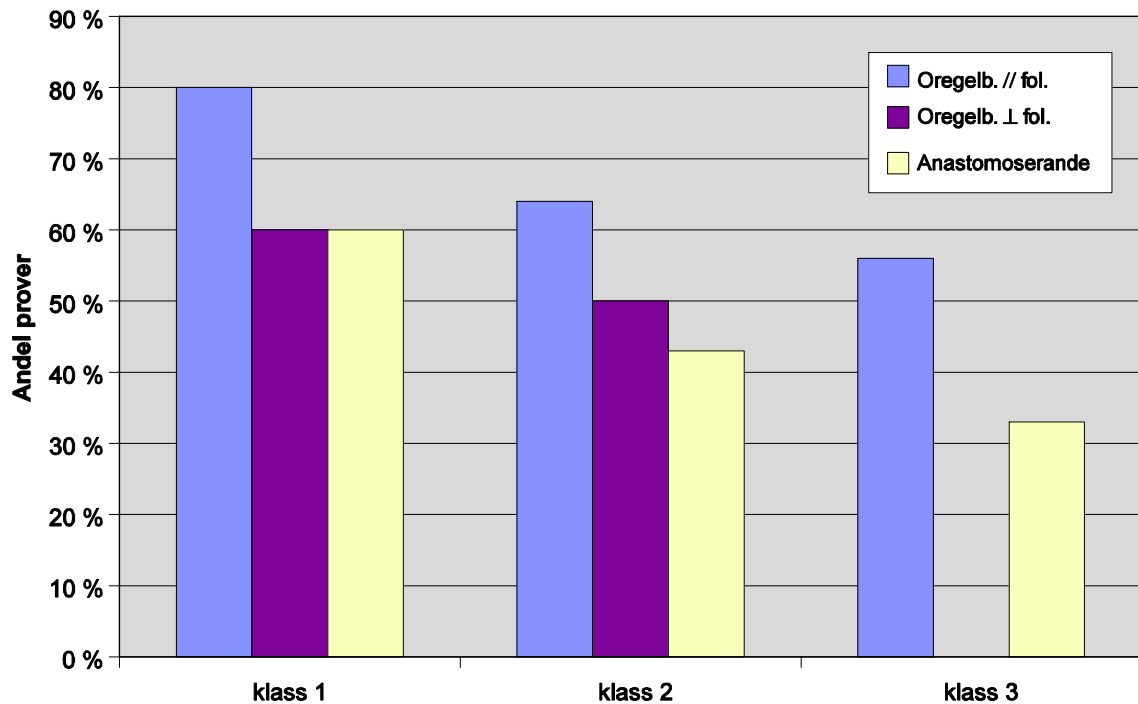


Fig. 7. Diagram redovisande medelvärden för morfologiska element (anastomoserande strukturer, parallella och vertikala oregelbundna strukturer) för respektive teknisk klass. Medelvärdet är uträknat som produkten av variationen och omfattningen (se vidare i texten) av det specifika elementet.

Vidare syns inget samband i någon av K_k -klasserna mellan bergartstillhörighet och utvecklingen av parallella resp. oregelbundna element. I enskilda prov kan man dock se att de allra lägsta K_k -värdena representeras av enbart oregelbundna element (i granitoider), medan de allra högsta K_k -värdena representeras av enbart parallella element (i sedimentådergnejsler). Detta förhållande som gäller extremvärdena kan sålunda inte utökas till att gälla som trend för hela provpopulationen.

Anastomoserande struktur. Flera prov har en utvecklad anastomoserande struktur, och dessa prov finns oftare representerade i K_k -klass 1 och 2 (se figur 7).

Cleavage domains. Trots urvalet av bergarter med relativt höga glimmerhalter, har det visat sig, på grund av den grova kornstorleken och heterogeniteten i bergarterna, att systemet med *cleavage domains* och *microlithons* inte i dessa bergarter varit ett lämpligt verktyg för beskrivning av parallellstrukturer. Resultaten visar att heterogeniteten försvårat bedömningen så pass att det i princip inte gått att definiera parallellstrukturer i termer som *cleavage domains* och *microlithons*. Korrelation har inte gått att få. Mätning av avstånd har heller inte gått att

korrelera mot tekniska analysvärden. Det som mätts i bergarter med homogent fördelad glimmer (alltså kontinuerligt utvecklade, sett vinkelrätt mot parallellorienteringen) har blivit avståndet mellan glimmerkornen, vilket alltså inte ger någon korrelation. Bergarterna har dessutom varit så heterogena att det varit vanligt med flera olika, utvecklade strukturer. Det ska noteras att de tekniska analysvärdena inte speglar anisotropiegenskaper – eventuellt hade observationerna kunnat ge korrelation mot sådana testresultat, men vad gäller motstånd mot nötning och motstånd mot spröd fragmentering kan inte något samband ses.

Övergångar. Den parallella strukturen kan uppvisa olika mått av gradvisa eller diskreta övergångar, där båda är representerade i samma omfattning i alla tre klasserna. Utifrån resonemangen ovan är det osäkert om detta är en sann korrelation, eller möjligen bara visar att alla proverna är metamorfa bergarter som uppvisar, för den här parametern, tämligen gemensamma mönster.

Veckning. En stark positiv korrelation råder mellan andelen prover där veckning förekommer och K_k -värde (se figur 8). Den starka korrelationen var inte väntad, men då proverna studerades närmare, noterades att flera prover av de veckade dessutom är krusveckade, med utvecklade *shear bands*. Denna struktur utvecklas framför allt i glimmerrika bergarter, och ger förmodligen effekten av att fördubbla den effektiva klyvbarhetsytan i bergarten.

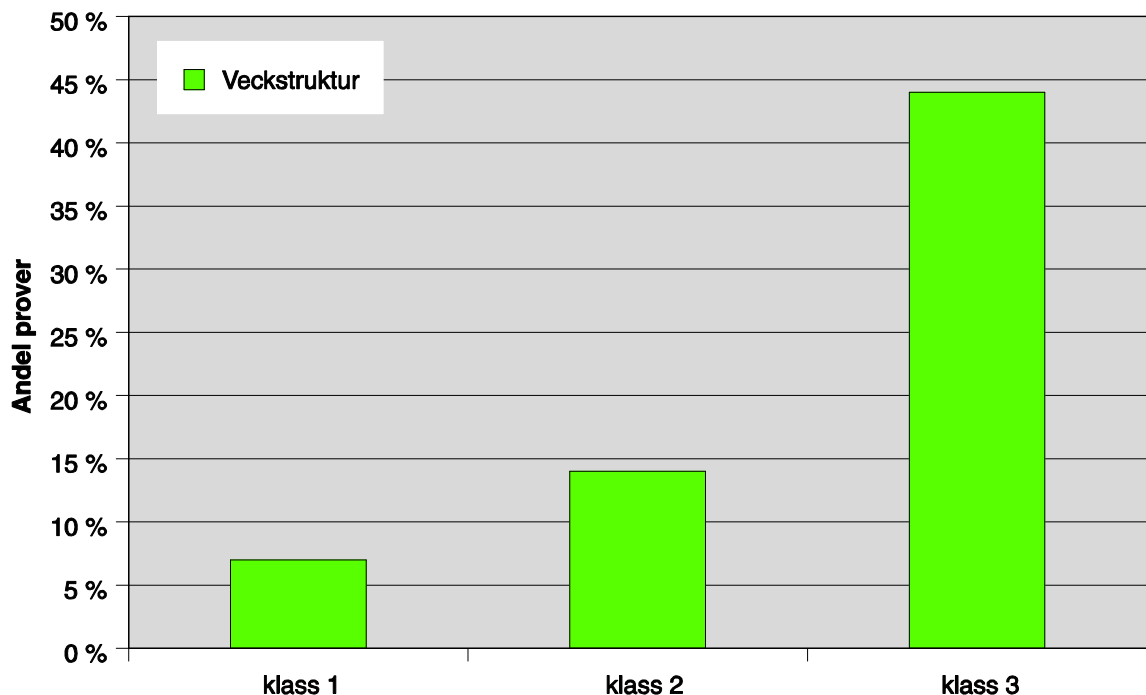


Fig. 8. Diagram redovisande andelen prover där veckning förekommer för respektive teknisk klass. Medelvärdet är uträknat som produkten av variationen och omfattningen (se vidare i texten) av det specifika elementet.

Intern stress i kvarts

Bedömningen av den interna stressen som är upptagen och bevarad i kvartskornen speglar vilken grad av ”kall” deformation bergarten har utsatts för. Initialt under deformation utvecklas en undulös utsläckning i kvartsen. Vid ökad deformation ökar den interna stressen och den undulösa utsläckningen övergår till subkornsbildning och slutligen bildas nya kvartskorn (nykornsbildning). Nykornsbildning kan även ske i form av statisk korntillväxt. De olika stresstillstånden existerar vanligen samtidigt och uppträder parallellt på olikartade sätt, t.ex. med en stråkvis, dominerande eller fläckvis fördelning.

Som indelningsgrund för grad används en femgradig skala: 1 = obefintlig till mycket låg, 2 = liten, 3 = medel, 4 = hög och 5 = mycket hög. För fördelning och variation används en femgradig skala i enlighet med vad som definierades under strukturer: 1 = ej noterad till enstaka korn, 2 = fläckvis, 3 = vanlig, 4 = jämnt utvecklad, växelvis dominerande och 5 = dominerande, 100 %. Genom att klassificera de olika beskrivande orden för ytmässig fördelning, har också fenomenen viktats – siffran anger som för strukturerna därmed att en bedömning har gjorts av hur stor påverkan variationen har.

Figur 9 konstruerades så, att för att kunna få ett värde som kunde plottas gruppvis mot K_k -klasserna beräknades produkter av grad och fördelning. Diagrammet visar de gruppvisa medelvärdena av produkten av de tre olika stresstillståndens grad och fördelning, plottat mot kulkvarnsklasser. En hög nivå av subkorn- och nykornsbildning samt en låg nivå av undulös utsläckning präglar prover med låga kulkvarnsvärden (bra motstånd mot skavande nötning).

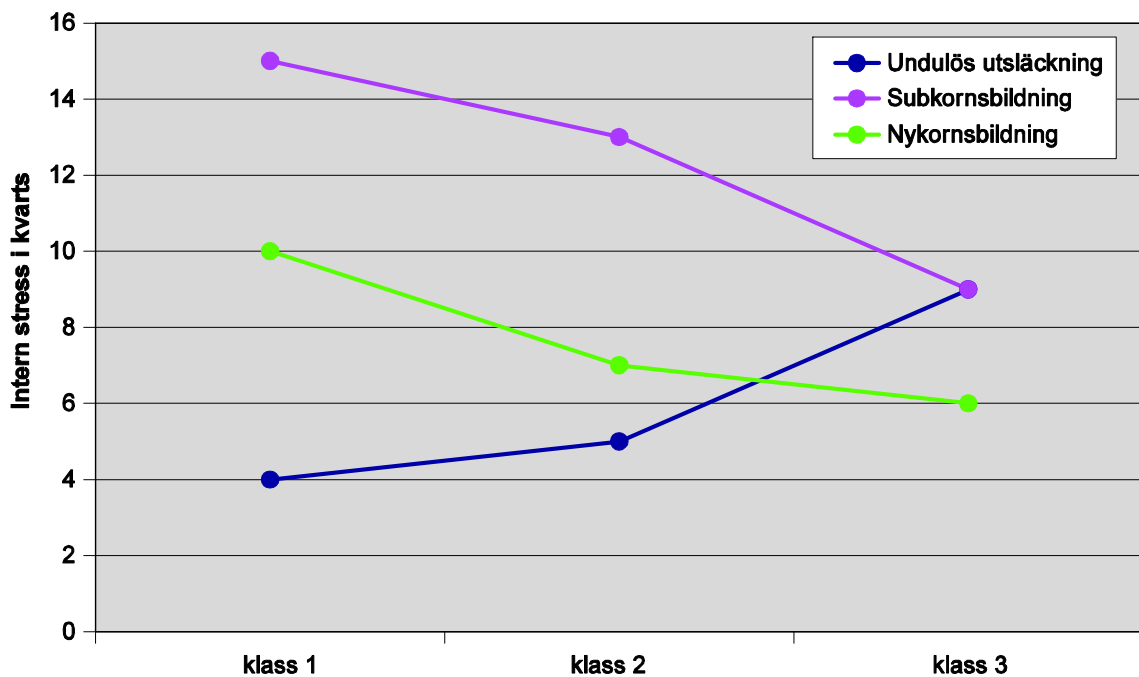


Fig. 9. Diagram redovisande graden av provernas interna stress uttryckt som summan av samtliga provers stresstillstånd, d.v.s. undulös utsläckning, subkornsbildning och nykornsbildning för respektive teknisk klass. Medelvärdet är uträknat som produkten av variationen och omfattningen (se vidare i texten).

Diagrammet visar också förhållandet att de inte bara är enskilda företeelser, utan visar även deras inbördes, ytmässiga fördelning. Då andelen korn med undulös utsläckning ökar, minskar andelen korn med högre stress i, vilket sker åt höger i diagrammet = sämre värden. Många av proverna med låga (bra) kulkvarnsvärden uppvisar förutom en allmänt dominerande fördelning av sub- och nykornsbildning även en stråkvis fördelning av detta.

SAMMANFATTNING

Resultaten har visat att man framgångsrikt kan utveckla terminologi och metodik för att beskriva strukturer, texturer och heterogenitet i metamorfa bergarter. Att detaljbeskriva de element som bygger upp strukturer är inte bara ett sätt att korrelera petrografiska parametrar mot tekniska analyser, utan ett hjälpmedel för att förstå bergartens geologiska historia.

Resultat har nåtts vad gäller kornstorleksfördelning, omkristallisering, heterogenitet, kompositionella band, strukturer och stress i kvarts. Inom strukturerna har resultat nåtts vad gäller typ av strukturelement och morfologiska parametrar. De morfologiska parametrarna, omkristallisering och heterogenitet har visat sig vara väl lämpade för att beskriva grova, heterogena bergarter.

De goda korrelationer som kunnat påvisas, markerar vilket kraftfullt redskap metodiken har varit. Att definiera variationerna, att beskriva delarna, att kvantifiera petrografiska parametrar, att skapa nya bedömningsgrunder har en plats i petrografisk analys.

Resultaten stärker slutsatserna från det tidigare FoU-projektet, att ingen parameter förklarar ensam en bergarts mekaniska egenskaper, att geologiska generaliseringar inte motsvarar bergkvalitetsgeneraliseringar, att de faktorer som styr styrkeegenskaperna i en bergart, inte behöver vara samma faktorer för en annan bergart, att de bevarade delarna av en bergarts geologiska historia avgör bergartens mekaniska egenskaper.

LITTERATUR

- Barker, A.J., 1990: *Introduction to metamorphic textures and microstructures*. Blackie. 162 s.
- Brattli, B., 1990: Geologiske parameterenes betydning for steiners styrkeegenskaper. Doktor ingeniøravhandling. *Norges Tekniske Høgskole 1990:86*. 23–57.
- Ersoy, A. & Waller, M.D., 1995: Textural characterisation of rocks. *Engineering Geology* 39, 123–136.
- Hareland, G., Polston, C.E. & White, W.E., 1993: Normalised rock failure envelope as a function of rock grain size. *International Journal of Rock Mechanics Vol. 30, No. 7*, 715–717.
- Hawkins, B., 1998: Aspects of rock strength. *Bulletin of the Engineering Geology and the Environment* 57, 17–30.
- Howarth, D.F. & Rowlands, J.C., 1987: Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 20, 57–85.
- Höboda, P., 1987: Glimmer i vägmaterial. Inverkan på egenskaper och analysmetoder för glimmerhalt. *Statens väg- och trafikinstitut VTI Meddelande 527*, 66 s.
- Lindqvist, J.E. & Åkesson, U., 2001: Image analysis applied to engineering geology, a literature review. *Bulletin of the Engineering Geology and the Environment* 60, 117–122.
- Olsson, E.-L., 2004: Makadamballast för järnväg, *Banverket BVS 585.52*. 29 s.
- Passchier, C.W. & Trouw, R.A.J., 1998: *Microtectonics*. Springer. 289 s.
- Spry, A., 1969: *Metamorphic textures*. Pergamon Press Ltd. 352 s.
- Powell, C.M.A., 1979: A morphological classification of rock cleavage. *Tectonophysics* 58, No.1–2, 21–34.
- Räisänen, M., 2004: From outcrops to dust – mapping, testing, and quality assessment of aggregates. PhD-thesis. *Department of Geology, University of Helsinki No. 179*, 94 s.
- Svensk Standard, 1997: Ballast – Mekaniska och fysikaliska egenskaper – Del 2: Bestämning av motstånd mot sönderdelning. *Standardiseringen i Sverige SS-EN 1097-2*, 28 s.
- Svensk Standard, 2004: Ballast – Mekaniska och fysikaliska egenskaper – Del 9: Bestämning av motstånd mot nötning av dubbdäck (Nordiska kulkvarnsmetoden). *Standardiseringen i Sverige SS-EN 1097-9*, 11 s.
- Tsidzi, K.E.N., 1986: A quantitative petrofabric characterisation of metamorphic rocks. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology No 33*, 3–12.
- van der Plas, L. & Tobi, A.C., 1965: Chart for judging the reliability of point counting results. *American Journal of Science Vol. 263*, 87–90.
- Voort, G.V., 1991: ASTM Committee E-4 and Grain Size Measurements: 75 Years of Progress. *ASTM Standardisation News May Issue*. 12 s. Hämtat från <
<http://www.metallography.com/>> 28 september 1998.

Vägverket 2004: Allmän teknisk beskrivning för vägkonstruktion ATB VÄG 2004. *Vägverket Publ 2004:111*.

Walsh, J., 2003: The relationship between the cleavage properties of natural roofing slate and the thickness of the finished material. I Broekmans, M.A.T.M., Jensen, V. & Brattli, B. (red.): *Proceedings of the 9th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*. [cd-rom]. 9th EMABM Organizing Committee. 16 s

Åkesson, U., 2004: Microstructures in Granites and Marbles in Relation to their Durability as a Construction Material. Doctoral Thesis. *Earth Science Centre, Göteborg University A95*, 60 s.