

# Jämförelse av egenskaper hos kvartsit från olika fyndigheter



Erik Alldén  
2013

Teknologie kandidatexamen  
Naturresursteknik

Luleå tekniska universitet  
Institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser



# Jämförelse av egenskaper hos kvartsit från olika fyndigheter

Erik Alldén

Teknologie kandidatexamen  
Naturresursteknik

Luleå tekniska universitet  
Institutionen för samhällsbyggnad och naturresurser



## Sammanfattning

Detta arbete är utfört på beställning av LKAB, vilka vill säkra sin produktion av järnmalmspellet genom att utöka antalet leverantörer av kvartsit. Det är viktigt att säkerställa att kvartsiten håller tillräckligt hög kvalitet, och nya produkter måste därför testas. Kvartsit används av LKAB som tillsatsmedel vid tillverkning av järnmalmspellet.

Kvartsiten som undersökts i detta arbete kommer ifrån Tornio, Mårnes, Tana och Kvitnes.

Syftet med arbetet var att testa kvartsiternas malbarhet, kemiska sammansättning samt undersöka dem geologiskt. Det var önskvärt att ta reda på hur mycket malningsenergi (kWh/ton) som krävs att mala materialet till dess att 80% av partiklarna är mindre än 60 µm. Den geologiska undersökningen hade som mål att hitta vilka geologiska faktorer som påverkar malbarheten av kvartsiten.

Kvartsiten krossades i två steg i laboratoriekrossar, sedan maldes den i en laborationskvarn i tre olika maltider, 10, 15 och 20 minuter. Resultaten från dessa malningar analyserades och en ytterligare malning utfördes med olika maltider för varje kvartsit. I denna extra malning förväntades 80% av materialet bli mindre än 60 µm.

Resultatet av malningen visade att kvartsiten från Tornio kräver minst malningsenergi att mala, medans de andra 3 kvartsiterna använder relativt lika mängd malningsenergi. Tyvärr misslyckades den extra malningen eller analysen av den extra malningen, eftersom resultaten blev orimligt höga.

Resultatet av den kemiska analysen visar att kvartsiten från Tornio har 93,94% SiO<sub>2</sub>, medans de andra kvartsiterna har SiO<sub>2</sub>-halter över 97%. Kvartsiten från Tornio har betydligt högre halter kalium och aluminium än de andra tre kvartsiterna.

Den geologiska undersökningen visade att kvartsiten från Tornio har stora skillnader gentemot de andra, dels är den mer finkornig, men även metamorfoshalten är lägre. Kvartsiten från Mårnes och Kvitnes har makroskopiskt stora skillnader, men mikroskopiskt liknar de varandra. Det är tydligt att kvartsiten från Tana kommer från två olika miljöer då ena har hög metamorfosgrad och den andra låg. Den högmetamorfa kvartsiten från Tana har stora likheter med de från Mårnes och Kvitnes.



## Abstract

This work was made by the order of LKAB, who required to secure their production of iron-ore pellets by adding more suppliers of quartzite. It is vital to ensure that the quartzite has enough high quality. Therefore, new products must be tested. Quartzite is used by LKAB as an additive in their iron-ore pellet production. The quartzites that were tested in this project come from Tana, Mårnes and Kvitnes in Norway, as well as Tornio in Finland.

The goal of this project was to test the quartzites in three different fields; how well they grind, chemical composition and geological study. It was desirable to find out how much grinding energy (kWh/ton) it takes to grind the quartzite until 80% of the particles in the material is smaller than 60  $\mu\text{m}$ . The purpose of the geological study was to find which geological factors that could affect grindability of the quartzites.

Each quartzite was crushed two times in different sized laboratory crushers, and then they were ground using three different times, 10, 15 and 20 minutes. The results from these grindings were analyzed, and each quartzite was then ground one additional time, with a specific calculated grinding time. There were expectations that 80% of the quartzite particles would be smaller than 60  $\mu\text{m}$ .

The results from the grindings showed that the quartzite from Tornio needed the least amount of grinding energy, while the other three quartzites needed quite an equal amount of energy. Unfortunately, there were issues with the additional grindings of the quartzites, or the analysis of it, because the results appeared to be much higher than expected. The results from the chemical analysis showed that the quartzite from Tornio has 93,94%  $\text{SiO}_2$ , while the other quartzites have  $\text{SiO}_2$  of more than 97%. Thus, the quartzite from Tornio has significantly higher amounts of potassium and aluminum, than the other three quartzites.

The geological survey showed that the quartzite from Tornio differ significantly compared with the other quartzites, partly because it is more fine-grained, but it also has a lower degree of metamorphosis. The quartzites from Mårnes and Kvitnes look very different from each other when comparing with the naked eye, but they look similar with the use of a microscope. Additionally, it is obvious that the quartzite from Tana come from two different geological settings, because one have low degree of metamorphosis while the other has high. The quartzite from Tana with high degree of metamorphosis is comparable to the one from Mårnes and Kvitnes.



## Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	i
Abstract .....	ii
1 Inledning.....	1
1.1 Allmänt .....	1
1.2 Syfte.....	1
1.2.1 Frågeställning .....	1
1.3 Avgränsningar .....	1
2 Bakgrund .....	1
2.1 Beskrivning av bergarten kvartsit.....	1
2.2 Kvartsits användningsområden.....	2
2.3 LKABs användning av kvartsit .....	2
2.4 Beskrivning av kvartsitfyndigheterna.....	3
2.4.1 Tana.....	3
2.4.2 Mårnes .....	5
2.4.3 Tornio .....	7
2.4.4 Kvitnes .....	8
3 Metod .....	9
3.1 Geologisk beskrivning .....	10
3.2 Krossning.....	10
3.3 Malning.....	11
3.4 Analyser.....	12
4 Resultat.....	12
4.1 Geologisk beskrivning .....	12
4.1.1 Tornio .....	12
4.1.2 Mårnes .....	14
4.1.3 Tana.....	16
4.1.4 Kvitnes .....	18
4.2 Resultat av krossning.....	20
4.3 Resultat av malning .....	22
4.4 Diskussion och slutsatser.....	23
4.5 Rekommendationer för fortsatta studier .....	24



5	Referenser.....	25
6	Bilagor.....	26



# 1 Inledning

## 1.1 Allmänt

En av LKABs viktigaste produkter är järnmalmspelletsen. Den består av ca 67 % järn, men även av flera olika tillsatsmedel. För att pelletsen ska få rätt egenskaper och sammansättning används tillsatsmedlen kalksten, dolomit, olivin, bentonit samt kvartsit. Var och ett av tillsatsmedlen fyller viktiga funktioner som påverkar reduktionsprocessen i masugnen. LKAB arbetar med att säkerställa leveranser av tillsatsmedel genom att utöka antalet leverantörer. Potentiella leverantörer av kalksten har i tidigare arbeten undersökts och en liknande undersökning ska i och med detta arbete utföras för kvartsit. I flera år har LKAB köpt sin kvartsit från norska leverantören Elkem, vilka bryter kvartsiten i Tana och Mårnes i Norge. Det finns flera potentiella alternativa leverantörer; en i Tornio, Finland; samt en i Kvitnes, Norge. De potentiella alternativa leverantörerna ska jämföras mot den nuvarande kvartsiten från Tana och Mårnes. De faktorer som i detta arbete kommer att undersökas är den kemiska sammansättningen, åtgången malningsenergi samt texturer och geologiska faktorer. För LKAB är det viktigt att kvartsiten innehåller så låga halter som möjligt av alkali, dvs.  $\text{Na}_2\text{O}$  och  $\text{K}_2\text{O}$ , att den har så hög halt  $\text{SiO}_2$  som möjligt, samt att den är enkel att mala till rätt fraktioner. Det är även av intresse att kartlägga geologin i de fyra kvartsitbrotten, men mängden tillgänglig information varierar.

## 1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att jämföra kvartsiternas malningsegenskaper och kemiska sammansättningar.

### 1.2.1 Frågeställning

1. Hur mycket malningsenergi krävs det att mala respektive kvartsitsort tills 80% av materialet är mindre än  $60\mu\text{m}$  ( $K_{80}=60$ )?
2. Finns det något samband mellan hur kvartsitens ursprung och dess malningsegenskaper?
3. Hur höga halter av  $\text{SiO}_2$  och föroreningar har respektive kvartsit?

## 1.3 Avgränsningar

Arbetet kommer inte innefatta ekonomiska, logistiska eller metallurgiska aspekter. Rapporten kommer fokusera på kvartsitens malbarhet, kemi, texturer samt kvartsitbrottens geologi.

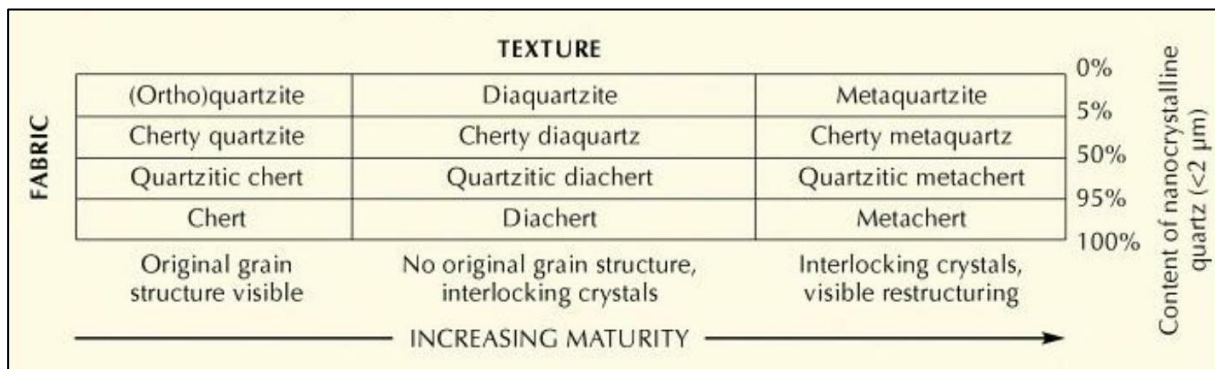
# 2 Bakgrund

## 2.1 Beskrivning av bergarten kvartsit

Kvartsit är en metamorf bergart som i huvudsak består av  $\text{SiO}_2$ . Det finns två olika huvudvarianter av kvartsit, beroende på hur de bildats; metakvartsit och ortokvartsit. Metakvartsit bildas när sandsten utsätts för metamorfos med högt tryck och temperatur, vilket



får kvartskornen att växa samman. Alla tidigare texturer utplånas och en stark kvartsit med hög densitet blir resultatet. Vid bildandet av ortokvartsit utsätts sandsten för lågt tryck och låg temperatur, och cirkulerande vätskor fyller tomrummen mellan kvartskornen med ”kiselcement”. Ortokvartsit anses vara en sedimentär bergart, då ursprungliga mineralkorn och sedimentära strukturer finns kvar. I mikroskop kan ortokvartsit särskiljas från metakvartsit. Kvartsit består i huvudsak av  $\text{SiO}_2$ , men kan innehålla föroreningar såsom aluminium, järn, natrium och kalium. Oftast har kvartsit vit färg, men färgen kan variera i andra ljusa färger beroende på dess föroreningar. Kvartsit har fetaktig glans och vittrade ytor är gryniga. När kvartsit klyvs blir brottytona släta och följer inte korngränser. Kvartsit kan bildas både av kontakt- och regionalmetamorfos men bildas oftast som resultat av bergskedjebildande tektoniska processer. Kvartsit är hårt och värmebeständigt vilket medför att den är svårvittrad och användbar som industrimineral.



Figur 1. Klassifikation av kvartsiter (Hunt, 1995).

## 2.2 Kvartsits användningsområden

Kvartsit har många användningsområden eftersom den har värdefulla egenskaper såsom hårdhet, värmebeständig, olöslighet för syror och är vanligt förekommande. Kvartsit används för att tillverka järnmalmspellets, vägmaterial, byggnadsmaterial, sandpapper och annat eldfast material. Kvartsit av hög kvalitet kan användas för att tillverka glas och halvledare. Kvartsit har liten påverkan på miljön. LKAB använder kvartsit som tillsatsmedel dels för att ge pelletsen rätt kemiska innehåll, men även eftersom tillsats av kvartsit i pellets har visat sig minska svällning i reduktionsprocessen (Suup, 2009). Enligt Anna Marie Suup (2009) är kvartsits effekt i denna process inte fullständigt kartlagd.

## 2.3 LKABs användning av kvartsit

LKAB skriver på sin hemsida (2012-05-14); *Kvartsit minskar pelletsens svällning vilket främjar genomströmningen i reduktionsprocessen.*

Detta är främsta orsaken till att kvartsit används i pelletsen. Tidigare har LKAB bl.a. fått sin kvartsit från den närliggande kvartsitfyndigheten i Hopukka i närheten till Kiruna, men Hopukka-kvartsiten ska ha innehållit för höga halter av alkali ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ). Kvartsit som ska användas för detta ändamål ska ha en  $\text{SiO}_2$ -halt över 96,5% och en alkalihalt lägre än 0,45 %. I åtminstone tio år har LKAB köpt sin kvartsit från företaget Elkem som äger fyndigheterna





Tana och Mårnes, i Norge. Mängden kvartsit som LKAB har fått levererat till sig har varierat mellan 60kt till 110kt, med en viss ökning på senare år (diagram 1).

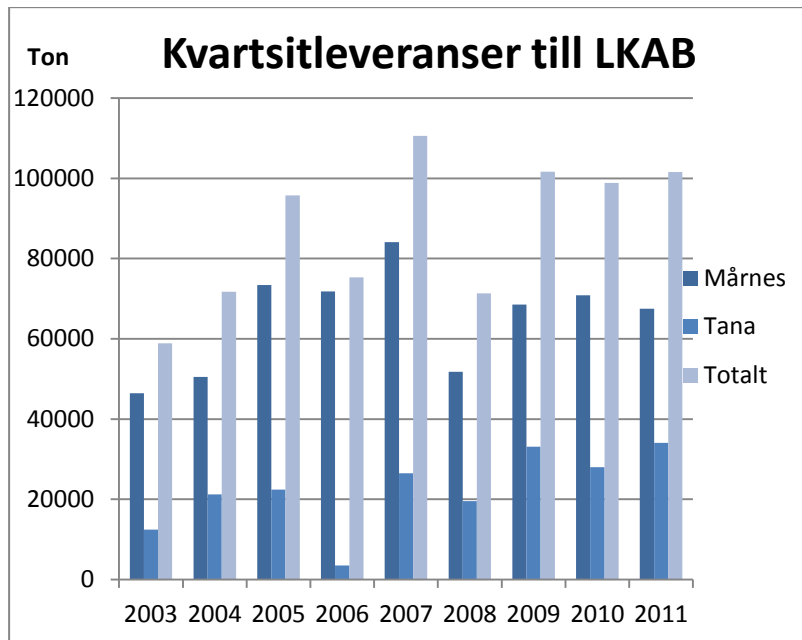


Diagram 1. Visar hur leveranserna av kvartsit till LKAB har varierat över åren.

## 2.4 Beskrivning av kvartsitfyndigheterna

Geologin i de olika kvartsitfyndigheterna har stora likheter med varandra, både när det handlar om hur de har bildats samt vid vilken tidpunkt. Dock är Tornio-kvartsiten betydligt äldre än de tre övriga, och därmed har Tornio-kvartsiten utsatts för fler skiftande tektoniska och geologiska händelser. Nedan beskrivs de olika fyndigheterna, men i vissa fall har källmaterialet varit fattigt vilket har påverkat innehållet. Materialet kommer främst från personal på de olika fyndigheterna, men även från NGU, GTK samt LKAB.

### 2.4.1 Tana

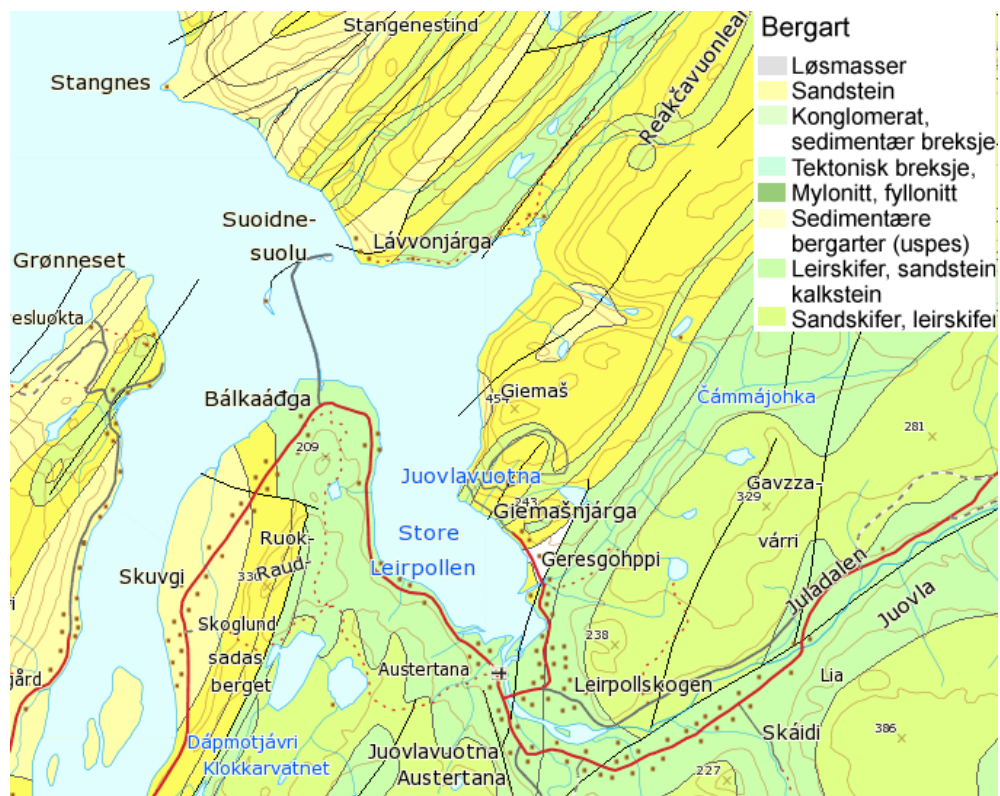
Kvartsitbrottet Tana finns intill Tanafjorden i östra Finnmarken, vid utloppet av Tana älv (Figur 4). Förekomsten kartlades första gången på 1970-talet av Syd Varanger gruva, och brytning påbörjades i mitten på 1970-talet. Den första kvartsiten var till ett ferrokiselverk på Island. 1983 köpte företaget Elkem fyndigheten, och vid denna tidpunkt producerade Tana ca 700 kt kvartsit årligen. Idag är produktionen ca 1 Mt per år, och leveranser sker till alla ferrokiselverk i Norge, Island, samt till LKAB. Kvartsiten i Tana har en stor mäktighet och flera tiotals miljoner ton har kartlagts över hela Varanger halvö (stor yta), men hittills har brytning endast skett på ett litet område i väster. Brytningen sker på en höjd på ca 350 meter över havet. Det finns förhoppningar att utöka brytningen till andra delar av Varanger halvö. Kvartsiten är till största del rosa-, röd- till lila-aktig i färgen, men den förekommer även i grått. Ökande halt av  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ger en mer mörkröd färg på kvartsiten. I figur 2 nedan visas typisk kvartsit från Tana i fraktionen 15-50mm, och det är värt att notera den lila-aktiga färgen samt att kvartsiten är massformig. Enligt NGU finns det en korrelation mellan halten av  $\text{Al}_2\text{O}_3$  och  $\text{K}_2\text{O}$  vilket indikerar muskovit som källa till föroreningarna i kvartsiten. På



vintern fryser ofta Tanafjorden och då krävs isbrytare för att kunna lasta kvartsiten. Kvartsiten bildades under slutfasen av neoproterozoikum, enligt Elkem ca 450 Ma sedan, genom avsättning av sediment på havsbotten som sedan har utsatts för metamorfos (K-S. Hugaas, Elkem 2012). I mikroskop har kvartsen avrundade korn vilket tyder på att kornen har nöts under transport och sedan sedimenterat. Kornen har viss sortering av kornstorlek i olika lager. Kornen har kvar vissa spår av sin ursprungliga form, vilket visar på att kvartsiten endast blivit utsatt för lågradig metamorfos. K-S. Hugaas på Elkem skriver att kvartsiten i Tana är mer finkornig samt mekaniskt och termisk starkare relativt kvartsiten i Mårnes.



Figur 2. Kvartsit från Tana, lilaaktig färg. Fraktionen 15-50mm.





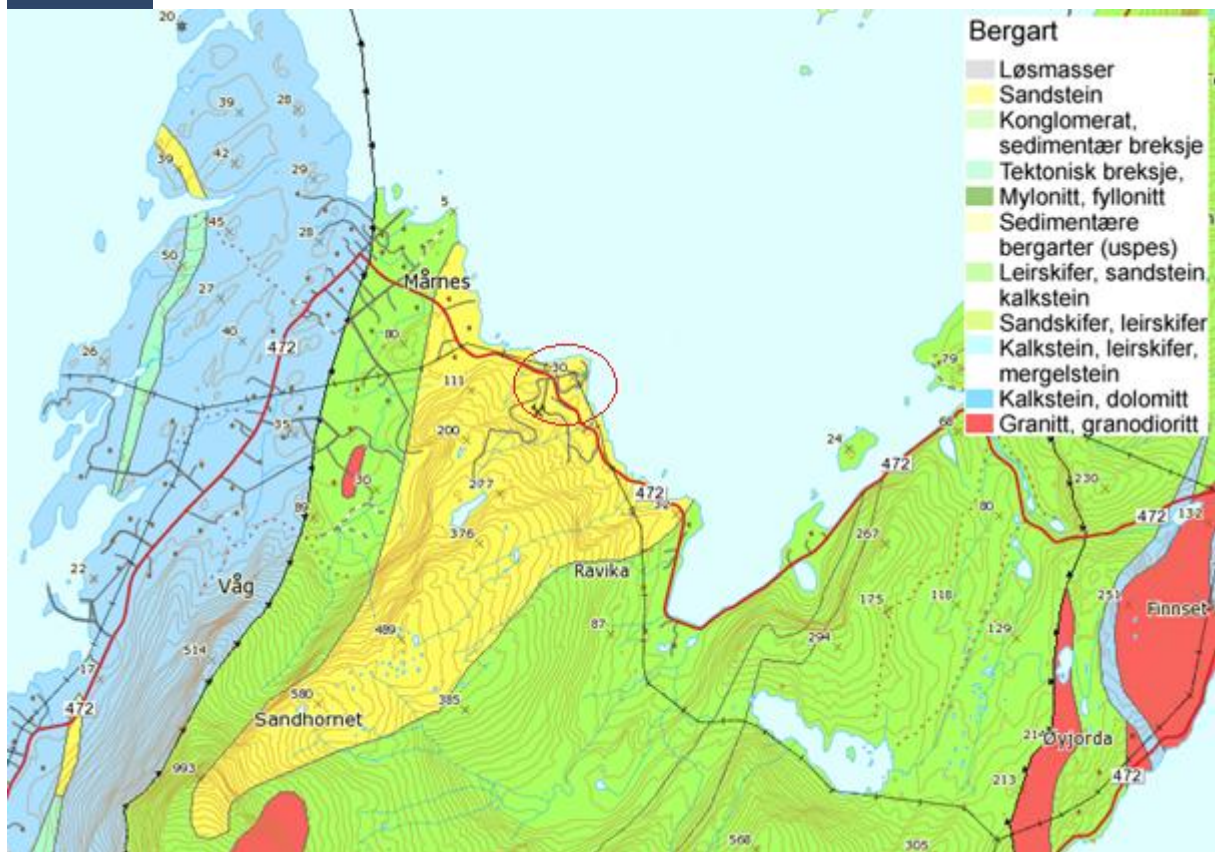
Figur 3. Berggrundskarta över Tana kvartsitfyndighet. (NGU, 2012)



Figur 4. Kartvy som visar kvartsitbrottet i Tana, Norge. (Google Maps, 2012-05-08)

### 2.4.2 Mårnes

Kvartsitförekomsten i Mårnes finns 6 mil söder om Bodö, i Gildeskål kommun. Förekomsten sträcker sig från havsnivå till öns högsta topp på ca 795 meter över havet. Kvartsiten är som mäktigast vid havsnivån där den är ca 300m tjock, och smalnar av mot toppen. Elkem har beroende på innehållet  $Al_2O_3$  delat upp förekomsten i tre olika kvaliteter, A, B och C. Den bästa kvalitén, A, finns mitt i fyndigheten. Brytningen startade 1970 och har fortsatt fram till idag. Elkem har kartlagt ”flera hundra miljoner ton” kvartsit i Mårnes. Kvartsiten bildades för ca 450 miljoner år sedan. Sedimenten avsattes på havsbotten, och har blivit starkt omvandlade av höga tryck och temperaturer. Kvartsiten anses vara grovkornig och vissa partier skifferiga. På skifferplanen finns glimmermineral, men Elkem siktar bort dessa. Fram till mitten på 1980-talet skedde endast produktion av A-kvalitén, och då gick produkten till ferrokiselverk, slaggbildare samt till betongindustrin. Senare började kvaliteter med mer än 0,5 %  $Al_2O_3$  att brytas och levereras till kunder med lägre krav, LKAB hör till dessa kunder. Idag är B-kvalitén den vanligaste i Mårnes. Idag bryts ca 200kt kvartsit varje år i Mårnes.



Figur 5. Berggrundskarta över Mårnes kvartsittfyndighet (NGU 2012).



Figur 6. Kartvy som visar kvartsitbrottet i Mårnes. (Google Maps, 2012-05-15)



### 2.4.3 Tornio

Kvartsitfyndigheten finns i Ristimaa, som ligger några mil öst från Tornio, Finland. Det är en gammal kvartsit, av Paleoproterozoisk ålder, 2,1-2,3 miljarder år gammal, och är en del av den Jatuliska formationen i Karelska supergruppen (Figur 7). Kvartsiten i Tornio tillhör även Kivalo group och Kvartsimaa formation. Kvartsiten är brantstående, stryker i öst-västlig riktning och stupar med 70 grader åt söder. Ett östligt och västligt brott skiljs åt av kvartsit med lägre kvalitet (lägre halt av SiO<sub>2</sub>, och högre halt fosfor). Veckstruktur syns tydligt i brottets väggar vilket också ger en viss variation i kvartsitens kemi. Metamorfosgraden är låg, och den har bildats genom regional metamorfos. Kvartsitlagrens varierar mellan 1000 och 1500 meter i tjocklek, och finns i ett bälte som går från sydväst till nordost. Till färgen är kvartsiten grå eller gul. Plan- och korsskiktningar vanliga och ofta förekommer böljeslagsmärken och torksprickor. Kvartsiten är av typen ortokvartsit. Den kan innehålla dolomitgångar upp till 10 meter i tjocklek.

Kronologi		Litosstratigrafi			
Ålder (Ma)	Eon	Grupp	Supergrupp	Orogeni/Period	Huvudsakliga bergarter
1100					
1300			Jotnium	Gravsänka	Sandsten, lersten
1500					
1700			Svekofennia	Molass Svekofenniska/ Flysch	Glimmerskiffer
1900		Kalev			
2100	Proterozoisk	Övre-Jatul	Karelia	Peneplan	Tuffit, svartskiffer, dolomit, kvartsit, platabasalt, kvartsit
2300		Undre-Jatul	Laponium	Gravsänka	
2500		Övre-Lapponia Undre-Lapponia			Vulkanit, svartskiffer, kvartsit
2700	Arkeisk		Tunsa	Lopiska	Orto- och paragnejs
2900				Saamisk	

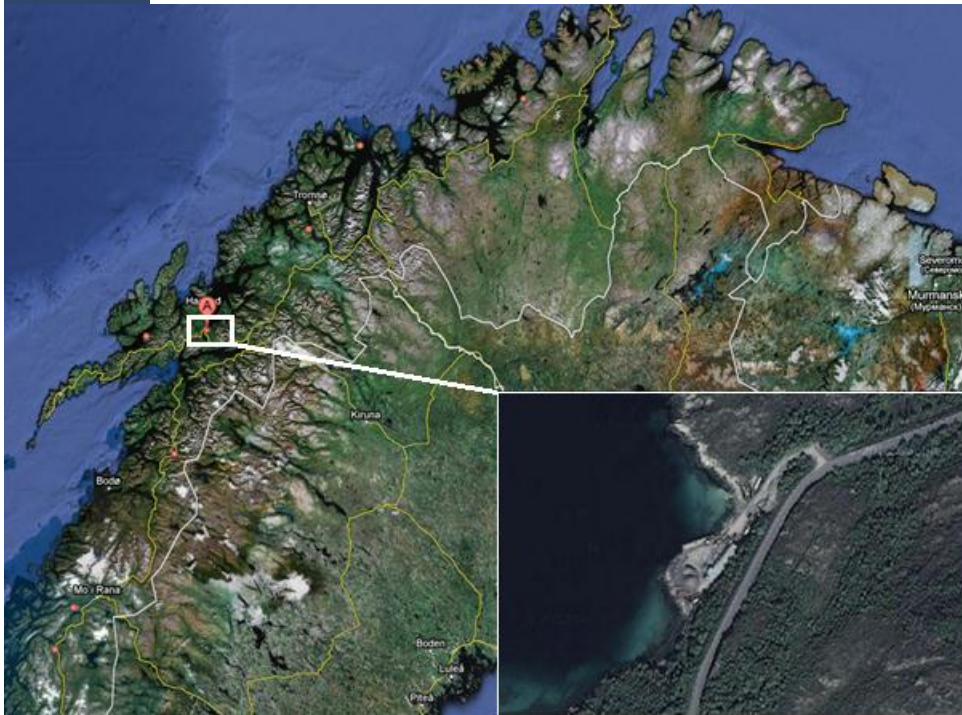
Figur 7. Stratigrafin i norra Finlands berggrund.



Figur 8. Kartvy som visar kvartsitbrottet i Ristimaa, Tornio, Finland.(Google maps 2012-05-08)

#### 2.4.4 Kvitnes

Kvitnes kvartsitfyndighet ligger en kilometer norr om Tjeldsunsbrua, och ca 5 mil nordväst om Narvik. Fyndigheten är inte i produktion, och borring i syfte att ytterligare kartlägga fyndigheten är planerad att påbörjas senare under året (2012). Kvartsiten bildades för ca 600 miljoner år sedan genom kontaktmetamorfos och storleken är uppskattad till ca 246Mt. Området domineras av kvartsit som innehåller glimmer och fältspat, men partier av ren kvartsit förekommer växelvis. Kvartsiten har grå till mjölkvit färg, och en tjocklek på ca 10 m. Kvartsiten stryker i riktning NO-SV. Analyser av kvartsiten visar på en kvartshalt på över 98 %. Kvartsiten har glimmerskikt med 1-5 cm mellanrum, och kvartsiten innehåller ofta finfördelad sericit.  $Al_2O_3$ -halten varierar mellan 0,4 % till 0,8 % inom området. Kring år 2000 undersökte J-E. Wanwik fyndigheten på uppdrag av NGU, och skriver då att den var för liten för att vara ekonomiskt intressant. 2011 besökte personal från LKAB fyndigheten vilka då uttryckte intresse men att fler provborringar krävs för att säkerställa kvalitet och mängd. Vid detta besök fås uppgiften att produktionen planeras ligga på ca 600 000 ton/år, och LKABs personal skriver att kvartsiten ligger som ett veck (antiform), och att den oftast är folierad.



Figur 9. Kartvy som visar Kvitnes kvartsitfyndighet (Google maps 2012-05-15).



Figur 10. Vägskärning i Kvitnes kvartsitfyndighet. (T. Sterner, K. Holme, LKAB, L-G. Johansson, KGS)

### 3 Metod

Testmaterialet till projektet kom i olika fraktioner och mängder, vilka listas i tabell 1. Fyra representiva stuffer från varje fyndighet valdes ut, fotograferades, och skickades sedan till Vancouver Petrographics för tunnslipsberedning. Kvartsiten från Tornio kom i ett oljefat, och kvartsiten från Mårnes och Tana fanns i hinkar av metall. Kvartsiten från Kvitnes kom i fyra säckar med stuffer av väldigt olika storlekar. Innan krossning neddelas materialet till poster på ca 20-30kg av varje fyndighet. Metoderna i detta arbete är framtagna i samråd med handledare på LKAB och LTU. Att det just blev dessa metoder är dels för att de simulerar vad



som händer i LKAB's nuvarande produktionsprocess, men även eftersom utrustning finns på LKAB i Malmberget.

Tabell 1. Testmaterialens vikt och ursprung.

Kvartsitfyndighet	Land	Företag	Vikt (kg)	Fraktion
<b>Tornio</b>	Finland	SMA Minerals	Ca 300kg (Ett fat)	Ca 50-200mm
<b>Mårnes</b>	Norge	Elkem	50kg (1 hink)	10-50mm
<b>Tana</b>	Norge	Elkem	50kg (1 hink)	10-50mm
<b>Kvitnes</b>	Norge	Privatägd	66,69kg (4 säckar)	Ca 50-400mm (stuffer)

### 3.1 Geologisk beskrivning

Fyra stuffer från varje fyndighet, dvs. totalt 16 stuffer valdes ut och skickades till Vancouver Petrographics i Kanada för tunnslipsberedning. Den geologiska beskrivningen består av en makroskopisk och en mikroskopisk del. I den makroskopiska delen beskrivs de utvalda stuffernas färg, kornstorlek, sammansättning, textur och struktur. I den mikroskopiska delen används genomfallande ljus eftersom det endast finns fåtal opaka mineral i proverna. Målet med mikroskoperingen är att få en uppfattning av vad som skiljer proverna åt när det gäller kornform, texturer och föroreningar. Resultatet från den geologiska beskrivningen blir ett hjälpmedel för att förstå vad som ger kvartsiten dess mekaniska egenskaper.

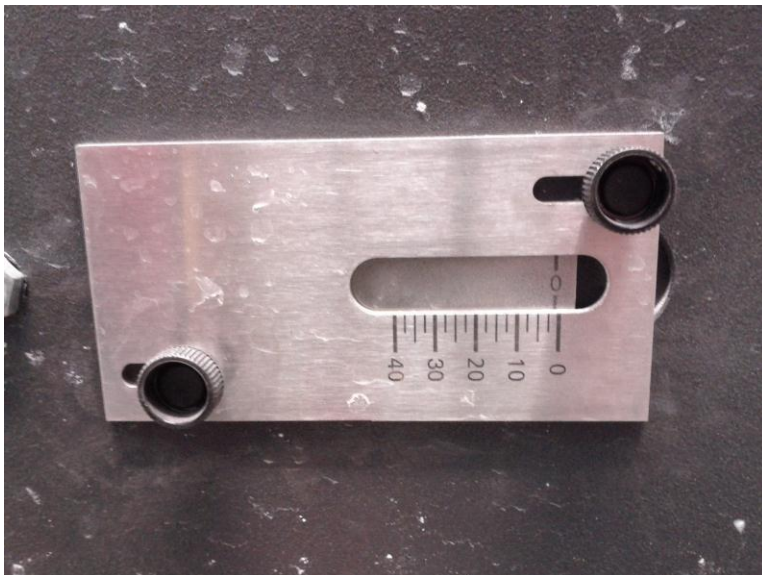
### 3.2 Krossning

Krossning sker i två steg, först i käftkrossen Retsch BB300 med 10mm spalt. Därefter i den mindre käftkrossen Retsch BB200 med en spalt på 1mm (figur 12). Efter krossning i BB200, siktas materialet genom en 0,8mm sikt. Materialet som inte går igenom sikten vägs och krossas i BB200 igen. Detta upprepas tills det att ca 93% av materialet passerar genom 0,8mm sikten.





Figur 11. Käftkrossarna Retsch BB300 och BB200 ([www.retsch.com](http://www.retsch.com) 2012-05-12).



Figur 12. 1mm spalt inställning på käftkrossen Retsch BB200.

### 3.3 Malning

Det krossade materialet delas ned till poster på 1kg, och mals sedan i en kvarn tillsammans med stålkulor (s.k. kulcharge) och vatten. Stålkulorna har en diameter på ca 14mm och en sammanlagd vikt på ca 13,1kg. Kvarnen är en laborationskvarn med innerdiameter 200 mm och innerdjup 250 mm. Kvarnen roterar 65 varv i minuten, och 1kg kvartsit mals tillsammans med 670g vatten (60 vikt% fast material).

Kvartsiten från varje fyndighet mals tre gånger under olika lång tid vid varje försök, detta för att ta fram ett samband hur vart och ett av materialen beter sig under malning. Lämpliga maltider bestäms på förhand med hjälp av LKAB's erfarenhet till att vara 10, 15 och 20 minuter. Efter varje malning samlas materialet upp i hinkar som får stå i värmeskåp tills dess att allt vatten har avdunstat, för att sedan analyseras av kvalitetsservice på FoU i Malmberget. Målet med malningarna är att ta reda på hur mycket malningsenergi det krävs för att 80% av



kvartsiten ska bli mindre än  $60\mu\text{m}$ , vilket förkortat kallas  $K_{80}=60\mu\text{m}$ . Malningsenergi mäts i kilowattimmar per ton (kWh/ton) och omvandlas till minuter genom förhållandet:  $1,3 \text{ kWh/ton} = 1 \text{ minut malning}$ . Detta förhållande används då det sedan tidigare är känt att 10 minuters malning motsvarar 13 kWh/ton driftbrutto.

Resultaten av siktanalyserna från krossning och malning används för att beräkna malningsenergin som krävs för respektive kvartsitsort att nå  $K_{80}=60\mu\text{m}$ , vilket sedan testas i en extra malning för varje fyndighet. Denna uträkning är gjord för hand av K. Taavoniku, LKAB, men och även kontrollerad i Microsoft Excell 2010. Malningsenergin som erfordras fås genom att rita upp  $K_{80}$ -värden från siktanalyserna i en scatterplot, och sedan linjarisera dessa med en trendlinje.

### 3.4 Analyser

Alla analyser av det krossade och malda materialet sker på kvalitetsservice laboratorium på FoU (Forskning och Utveckling) i LKAB, Malmberget. På det krossade materialet utförs siktanalysen "SA90". På det malda materialet utförs siktanalysen SA45 samt XRF-analys. På den extra malningen utförs även kol- och svavelanalys samt att XRF-analys utförs på var och en av SKA45-siktfraktionerna. Dessa analyser tar fram det empiriska materialet. I siktanalysen "SA90" torrsiktas materialet till fraktioner ned till  $90\mu\text{m}$ . Siktanalysen "SA45" går till på samma sätt som "SA90" med undantag att materialet först våtsiktas på ett siktnät som släpper igenom partiklar mindre än  $45\mu\text{m}$ , vilka sparas och torkas för vidare analys. XRF betyder röntgenfluorescens och används för att ta reda på vilka grundämnen ett material består av.

## 4 Resultat

### 4.1 Geologisk beskrivning

Det finns 4 stuffer och tunnslip från varje fyndighet, totalt 16 stuffer och tunnslip. Nedan beskrivs alla 4 fyndigheter både makroskopiskt och mikroskopiskt.

#### 4.1.1 Tornio

##### 4.1.1.1 Makroskopisk beskrivning

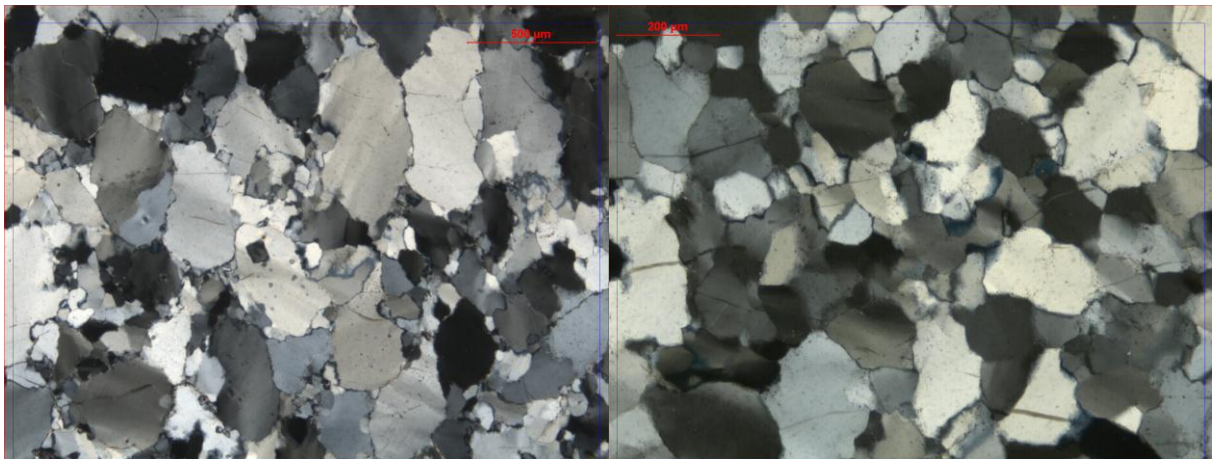
Kvartsiten från Tornio är homogen och har en finkornig textur med fettglans. Färgen är grå-gråbrun med fåtal mörkbruna pigment som impregneringar kvartsiten. Det finns tydliga avlånga sprickor med gul sprickfyllnad i kvartsiten. Kvartsiten spricker upp i smala, vassa och avlånga sjok, vilket beror på att de klastiska sedimenten har fått strukturer av plan- och korslagringar när de avlagrats. Eftersom sedimenten har avlagrats i grund syrefattig miljö är det troligt att den gula färgen och de mörka pigmenten består av mineralet hematit eller limonit.



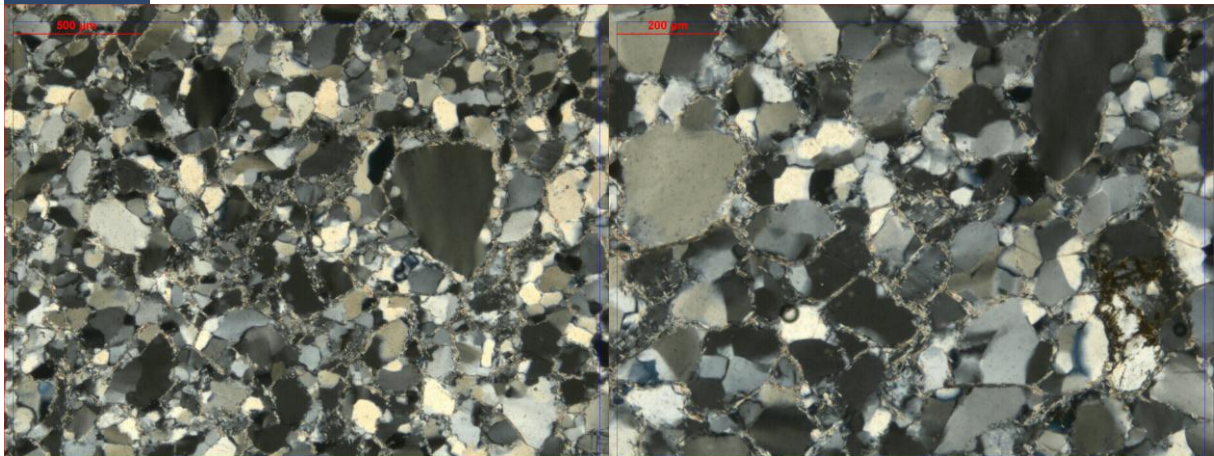
Figur 13. Stuff nummer. 1 och 4 av Tornio. Homogen finkornig kvartsit med impregnering och av järnoxider.

#### 4.1.1.2 Mikroskopisk beskrivning

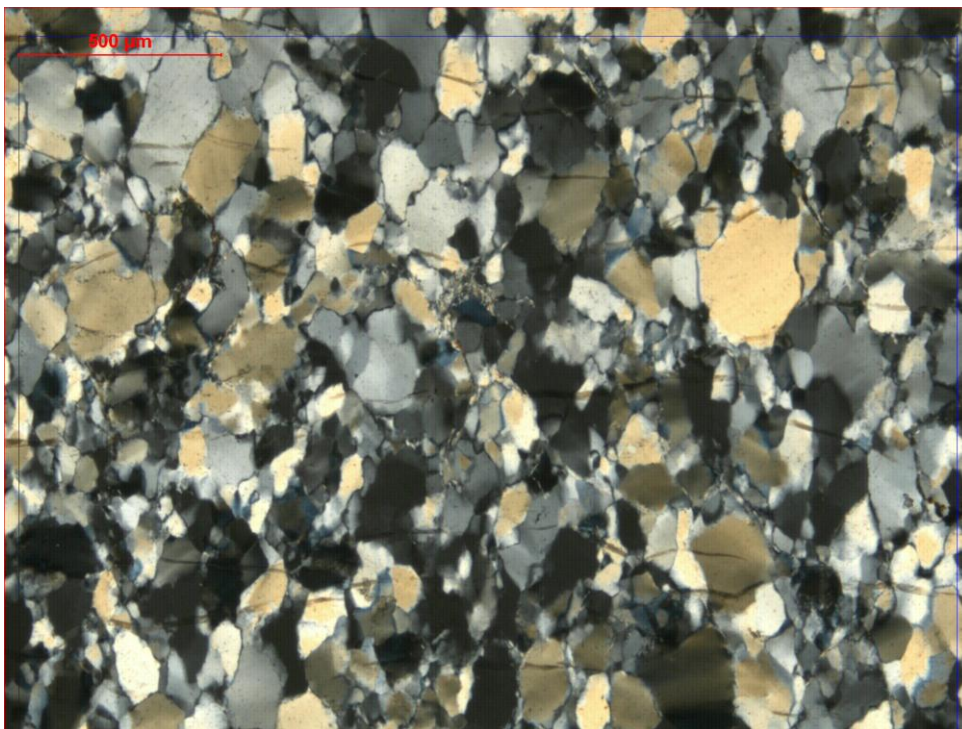
Det finns flera skillnader som skiljer tunnslipen från Tornio. Den mest slående skillnaden är att Tornio 1 endast har synliga korn av kvarts, medans Tornio 2, 3 och 4 alla har inslag av sericit och hematit i korngränserna. Sericiten påminner om taggtråd mellan kornen. Alla tunnslipen har gemensamt att kornstorleken ligger mellan ca 50-200  $\mu\text{m}$ , med majoriteten av kornen omkring ca 100  $\mu\text{m}$ . Denna kornstorlek är finare än de andra kvartsiterna. I alla tunnslipen är det vanligt att kvartskornen har sprickor samt det finns tydliga parallella sprickor som sträcker sig genom hela proven.



Figur 14. Tunnslip "Tornio 1". Finkornig kvart med komplexa korngränser. Endast mineralet kvarts synligt. Vänstra bilden är i skalan 500 $\mu\text{m}$  och den högra i 200  $\mu\text{m}$ .



Figur 15. Tunnslip "Tornio 2". Finkornig kvarts med sericit i korngränser. Högra bilden har ett opakt mineral i korngränserna, troligtvis hematit. Komplexa korngränser. Vänstra bilden är i skalan 500 µm och den högra i 200 µm.



Figur 16. Tunnslip "Tornio 4". Kvartsit med sericit i korngränser. Tydliga parallella sprickor genom hela provet. Bildens skala är 500 µm.

## 4.1.2 Mårnes

### 4.1.2.1 Makroskopisk beskrivning

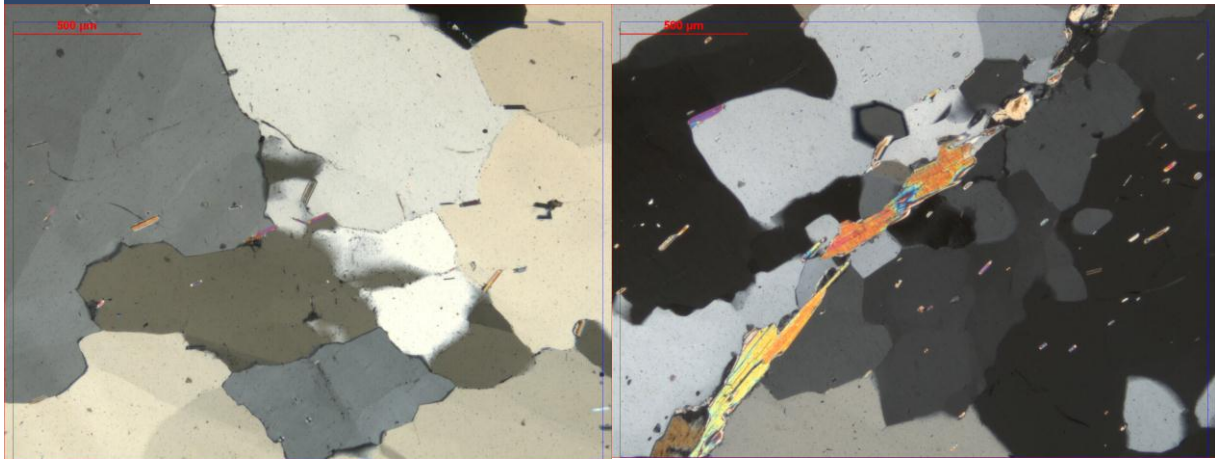
Färgen växlar mellan vit-ljusgrå samt en variant som är orange-röd. Kvartsiten är grovkornig, homogen, massformig och har fettglans. På stuf 2 och 4 täcker grå glimmermineral en av sidorna.



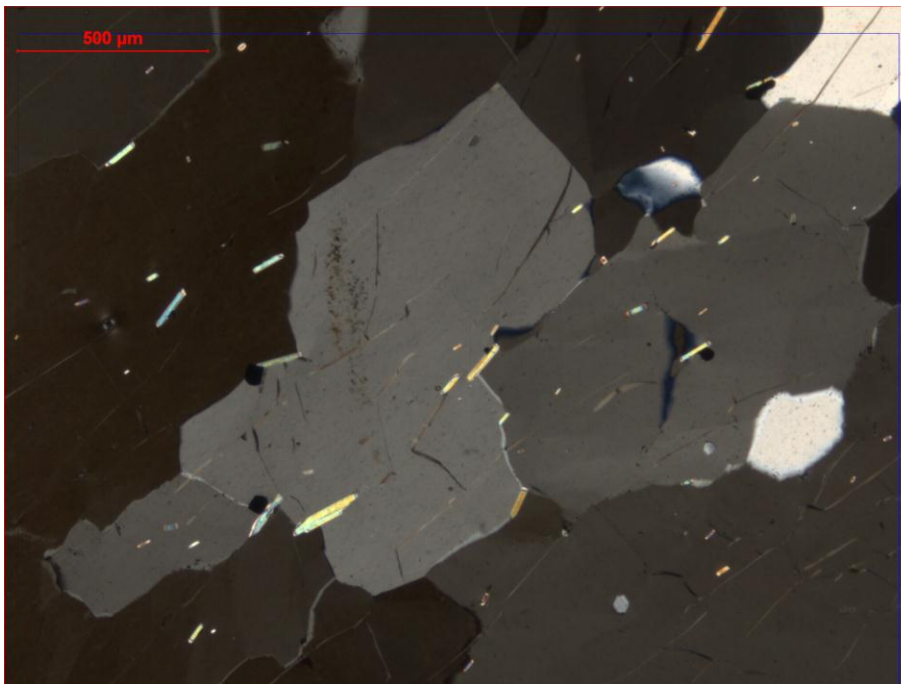
Figur 17. Stufferna "Mårnes 1" uppe till vänster, "Mårnes 2" uppe till höger, "Mårnes 3" nere till vänster, "Mårnes 4" nere till höger.

#### ***4.1.2.2 Mikroskopisk beskrivning***

Kvartsiten från Mårnes är högmetamorf och alla ursprungliga kvartskorn är sammanvuxna till större aggregat. Korngränserna är mycket enkla och alla fyra tunnslip är väldigt lika. Alla proven täcks av fina korn av glimmer men det finns även större långsträckta sjok av glimmer. Glimmern består till största del av muskovit men även biotit. Antalet sprickor varierar i varje prov, men tunnslip 4 hade störst mängd. Det är oklart vad som ger Mårnes 3 dess orange färg, men det är troligt att det finns mycket fina partiklar av hematit som sprickfyllnad, eller att Mårnes 3 har större halt biotit än de övriga.



Figur 18. Till vänster: Mårnes 1, till höger Mårnes 2. Båda proven är lika varandra. Grovkornig kvarts med enkla korngränser och impregnerat av finkornig glimmer. Mårnes 2 har ett större sjok av glimmer som sträcker sig genom hela provet. Glimmerkornen är oftast orienterade i samma riktning. Skalorna är 500 µm långa.



Figur 19. Tunnslip "Mårnes 4". Parallella sprickor i grovkornig kvarts. Fina glimmermineral orienterade i samma riktning som sprickorna. Enkla korngränser.

### 4.1.3 Tana

#### 4.1.3.1 Makroskopisk beskrivning

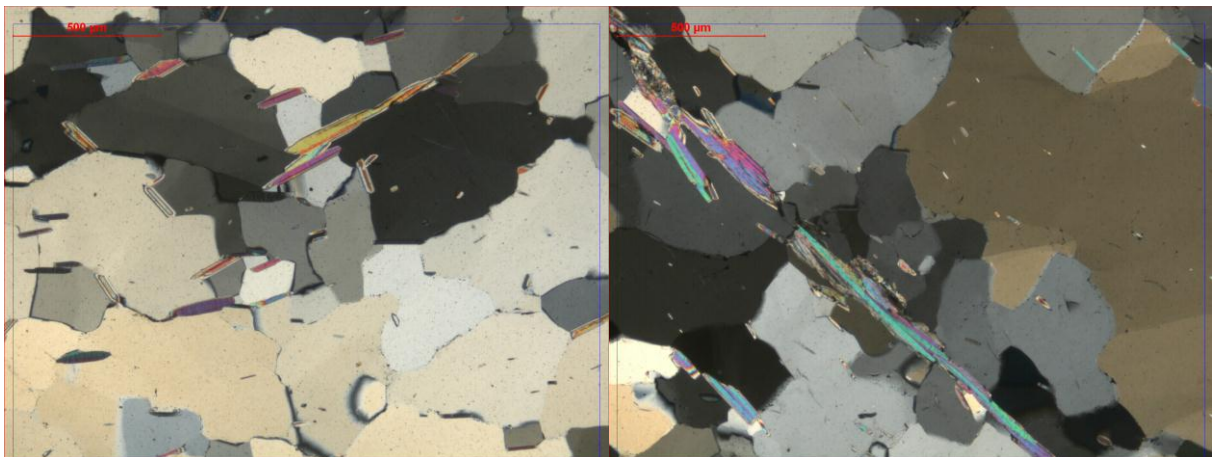
Undersökning av de fyra stofferna visar på två olika varianter. Den ena är ljusgrå, massformig och grovkornig utan synliga föroreningar förutom ett glimmerskikt på ena sidan på en av stofferna. Den andra varianten är ljuslila till röd, och färgen varierar i ljust och mörkt i olika skiktplan. Den ljuslila varianten är fin- till medelkornig. Det är troligt att föroreningar av hematit har gett den mörka färgen, vilket skulle innebära att de klastiska sedimenten har avsatts i en syrerik oxiderad miljö.



Figur 20. Stuff "Tana 2" till vänster och "Tana 3" till höger.

#### 4.1.3.2 Mikroskopisk beskrivning

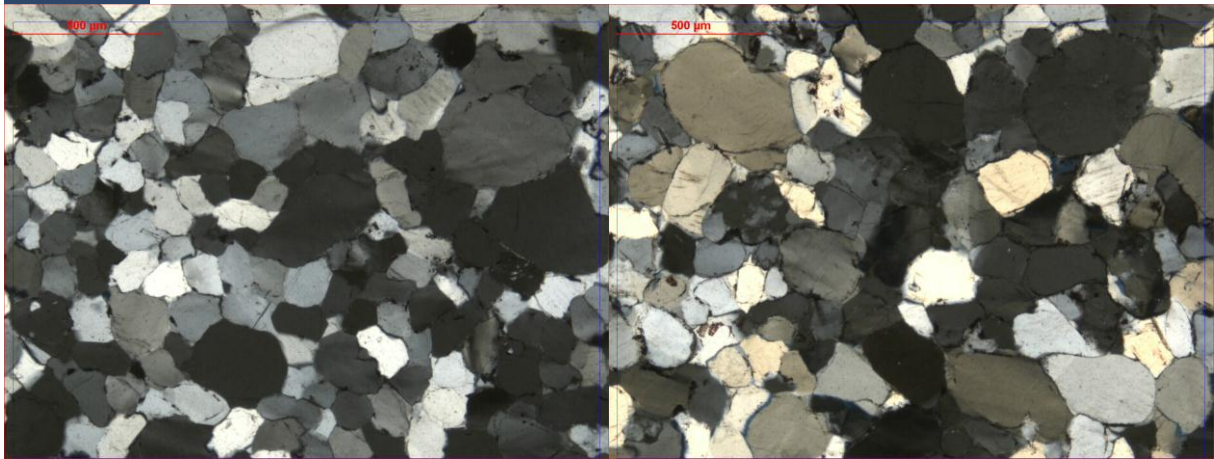
Tunnslip "Tana 1" och "Tana 3" är båda högmetamorfa med stora aggregat av kvarts, men de är ojämnkorniga då det även finns mindre korn. Korngränserna är enkla, och kvartsen är impregnerad av finkornig glimmer. I båda proven finns avlånga sjok av främst muskovit. Det är anmärkningsvärt att kvartskornen har så få sprickor, eftersom proven från Mårnes liknade dessa, men var täckta av sprickor. Glimmern är oftast orienterad i samma riktning.



Figur 21. Tunnslip "Tana 1" till vänster och "Tana 3" till höger. De är båda väldigt lika, med stora aggregat av kvarts, impregnerade av finkornig glimmer. Större sjok av glimmer, främst muskovit finns i båda proverna. Skalorna är 500 µm långa.

Tunnslip "Tana 2" och "Tana 4" är lågmetamorf och ojämnkornig, men de flesta kornen finns i intervallet 200-500 µm och är finare än de andra proven från Tana och Mårnes.

Korngränserna är enkla, och de flesta korn är runda. Kvartskornens runda former är spår av kornens ursprungliga form, och tyder på att sedimenten har transporterats innan de sedimenterat. I proven saknas glimmer, men det finns opaka mineral i korngränserna, troligtvis hematit. I tunnslip "Tana 2" och "Tana 4" ligger kornen i lager där kornstorlek växlar mellan grov- och finkornigt, men lagren är ofta veckade. Eftersom metamorfosgraden inte är samma för alla prov från Tana, måste kvartssiten härstamma från olika delar av fyndigheten, eventuellt från olika delar av ett veck.



Figur 22. Tunnslip "Tana 2" till vänster och "Tana 4" till höger. Skalorna är 500  $\mu\text{m}$  långa.

#### 4.1.4 Kvitnes

##### 4.1.4.1 Makroskopisk beskrivning

Stufferna från Kvitnes kan indelas i tre olika typer. "Kvitnes 1" och "Kvitnes 2" är homogena och massformiga. Färgen är ljusgul-grå med få mycket fina mörka mineral inblandat. På ett av planen finns grå-gul glimmer. "Kvitnes 4" är ljusgrå och spricker upp i raka plan, täckta av grå till mörkgrå glimmer. "Kvitnes 3" är gul-ljusgrå, och är impregnerad av ett finkornigt grönt mineral. Det gröna mineralet blir växelvis mer intensivt och bildar där två mörka plan. Mitt på stuffen finns ett gul-brunt lager.

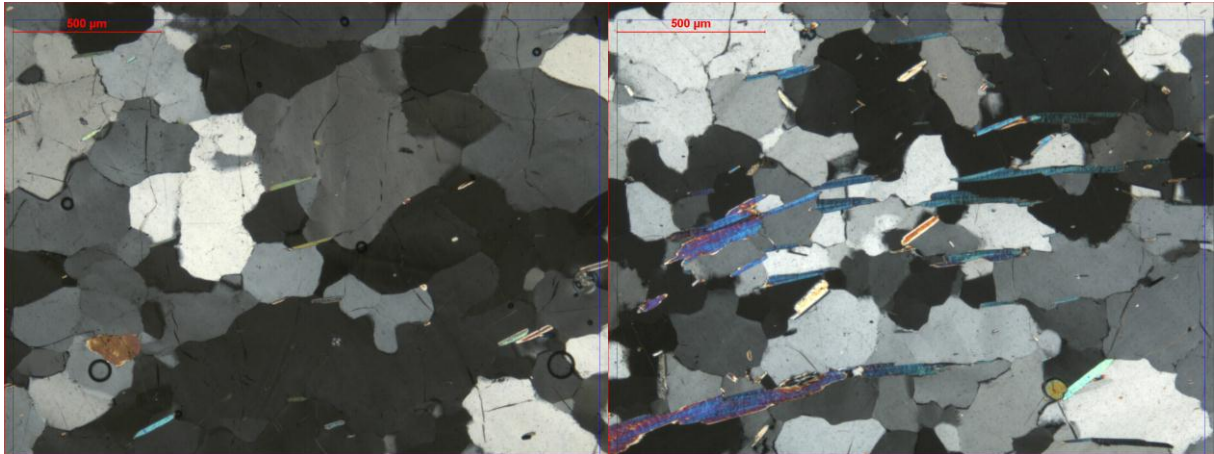




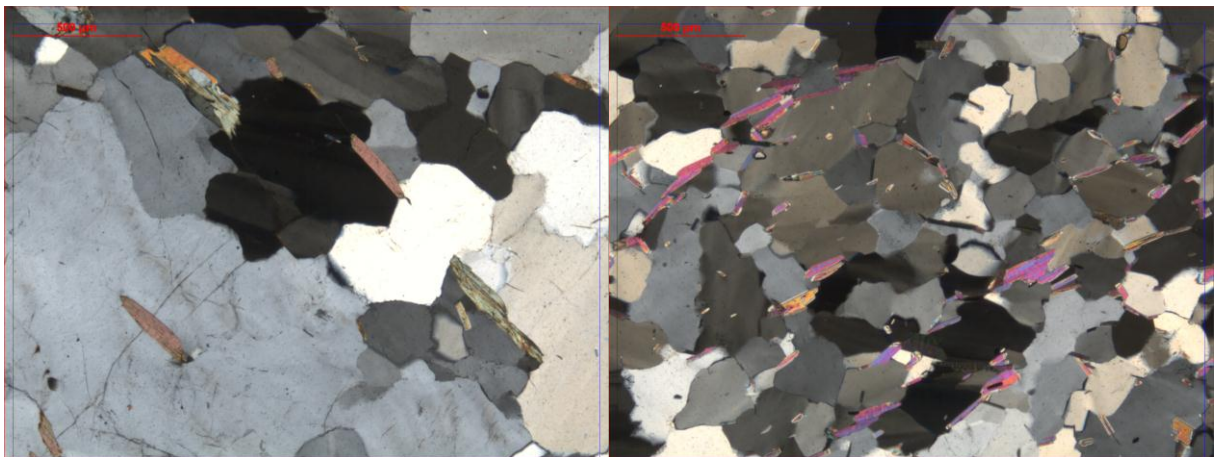
Figur 23. Stuff "Kvitnes 1" uppe till vänster och "Kvitnes 4" uppe till höger. "Kvitnes 3" nere till vänster.

#### ***4.1.4.2 Mikroskopisk beskrivning***

Kvartsiten i Kvitnes är medel-högmetamorf och medel-grovkornig. Kvartskornen i tunnslip 1-3 finns i stora sammansmälta aggregat med enkla korngränser. Tunnslip 4 skiljer sig åt genom att vara mer finkornig än de övriga, samt med komplexare korngränser. Det tyder på finare avsatta sediment men även en att den metamorfa processen har skett i flera steg. I alla fyra tunnslipen finns glimmer, men prov 3 och 4 har större andel biotit än de andra två. I alla slip finns mineralet Turmalin.



Figur 24. "Kvitnes 1" till vänster, "Kvitnes 2" till höger. Högmetamorf grovkornig kvarts med enkla korngränser och mycket sprickor. Stor mängd glimmer täcker tunnslipen. På vänstra bilden syns mineralet turmalin nere till vänster. Skالorna är 500  $\mu\text{m}$  långa.



Figur 25. "Kvitnes 3" till vänster, och "Kvitnes 4" till höger. Skالorna är 500  $\mu\text{m}$  långa.

## 4.2 Resultat av krossning

När materialet krossades framkom skillnader mellan de olika kvartsiterna, dels krävdes olika många krossningar samt att det tog olika lång tid. Diagram 2 visar hur många gånger varje kvartsitsort behövde krossas innan ~93% av materialet kunde siktas genom siktnätet på 0,8mm. Tornio var första materialet som krossades, och efter 8 krossningar kunde ~93% av materialet gå igenom sikten. Därför fick 93% bli riktmärket för de andra kvartsiterna.

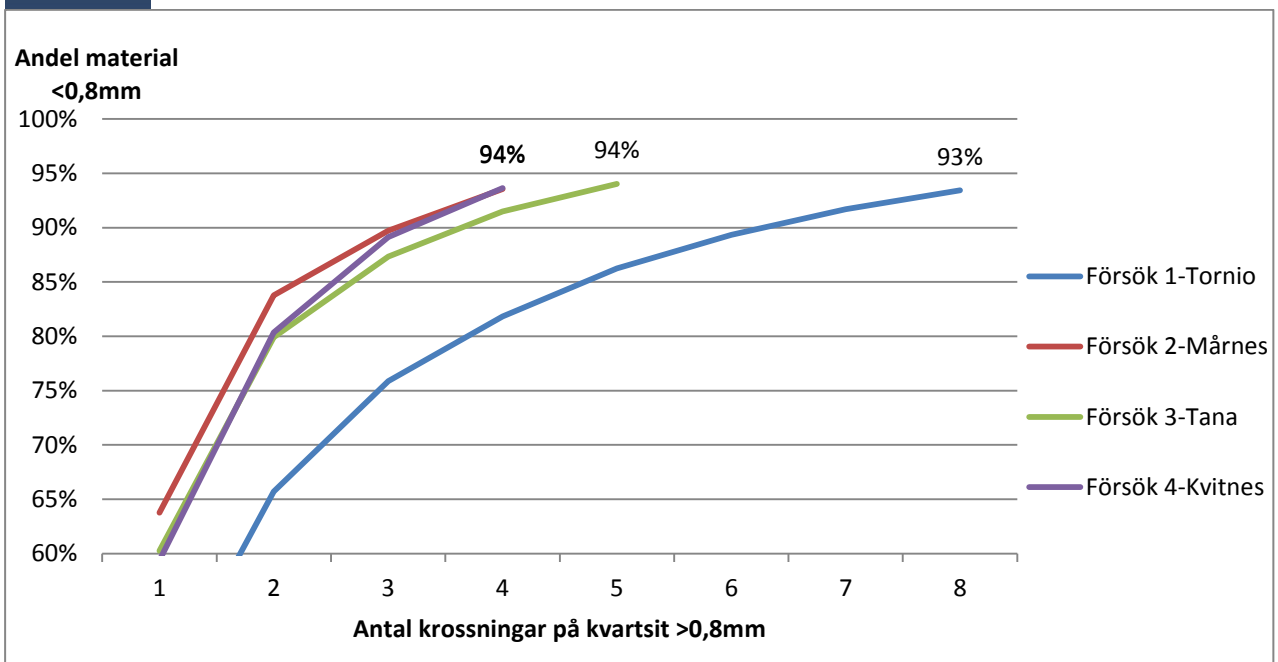
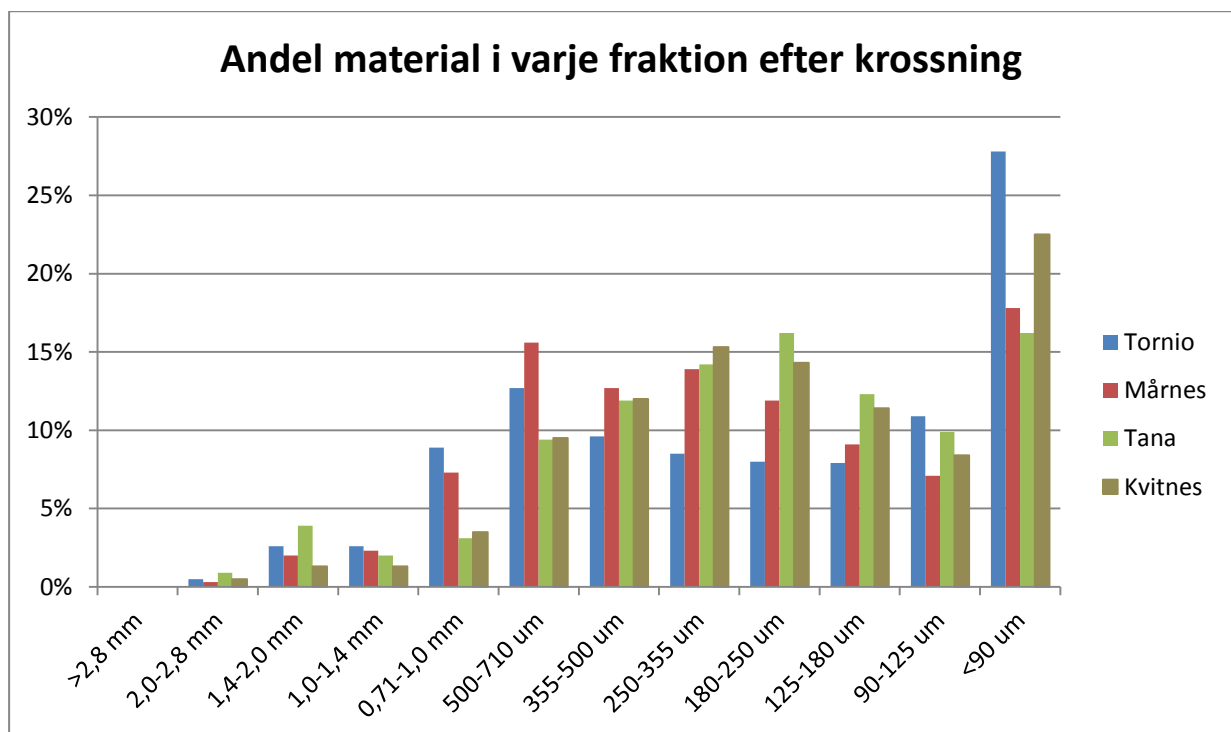


Diagram 2. Visar hur många krossningar som krävdes för att 93% av materialet skulle passera 0,8mm sikten.

Siktanalysen "SA90" utfördes på det krossade materialet och resultatet finns i bilaga 1. Tabell 2 visar hur materialet är fördelat i respektive fraktion, och anmärkningsvärt är att Tornio har större andel fint material än de andra kvartsiterna, medan Tana har minst andel fint material.



Tabell 2. Visar resultaten av siktanalysen "SA90" efter att materialet har krossats. Visar proportionerna av varje fraktion efter krossningen.



### 4.3 Resultat av malning

Resultatet från siktanalysen på den malda kvartsiten finns i bilaga 1. Diagram 3 nedan visar hur stor andel av den malda kvartsiten som består av partiklar finare än 45 µm. Tornio har betydligt större andel material finare än 45 µm jämfört med de övriga. I produktionen i LKAB, Malmberget finns riktvärdet att 66% av materialet ska vara finare än 45 µm.

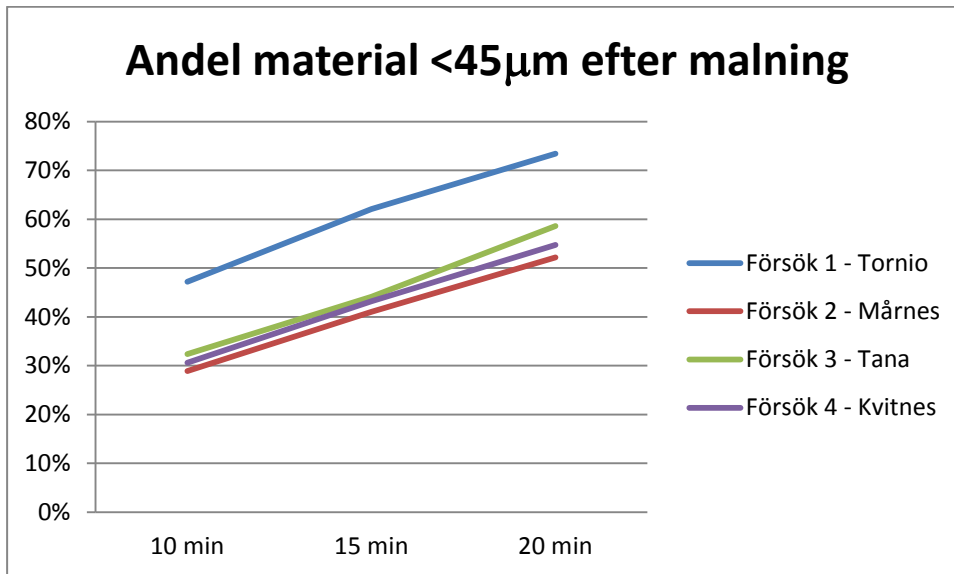


Diagram 3. Andel material finare än 45µm efter malning.

Det mest intressanta resultatet från siktanalysen är  $K_{80}$ -värdet. I tabell 2 nedan finns  $K_{80}$ -värdet för varje kvartsit efter krossning och malning. Tornio har grövst material efter krossning, men reagerar kraftigt på malningen och får genast finare material än de andra.

Tabell 2. Visar  $K_{80}$  värdet för krossning och malning.

$K_{80}$ (µm)	Utg. Kross	10 min	15 min	20 min
<b>Försök 1 - Tornio</b>	611,2	94,53	69,49	54,04
<b>Försök 2 - Mårnes</b>	591,9	151,01	102,01	79,2
<b>Försök 3 - Tana</b>	490,7	135,69	94,41	67,49
<b>Försök 4 - Kvitnes</b>	447,5	136,29	95,32	73,66

$K_{80}$ -värdena från siktanalysen används för att beräkna den extra maltiden för var och en av kvartsiterna, kompletta beräkningar finns i bilaga 4. I de extra malningarna används tider från K. Taavoniku, men som kontroll har även tider beräknats i Microsoft Excell.



I tabell 3 finns resultaten av de extra malningarna, i form av  $K_{80}$ -värdet, samt respektive malningstid.

Tabell 3. Visar  $K_{80}$  värdet för den extra malningen.

$K_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	Tid extra malning	Extra malning
<b>Försök 1 - Tornio</b>	18 min	66,87
<b>Försök 2 - Mårnes</b>	25 min 36 sek	68,94
<b>Försök 3 - Tana</b>	22 min	73,11
<b>Försök 4 - Kvitnes</b>	24 min 36 sek	69,73

Tabell 4 nedan visar resultat efter XRF-analys på material som blivit malt i 20 minuter. Kvartsiten från Tornio har lägre halt  $\text{SiO}_2$  och högre halt alkali ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) samt  $\text{Al}_2\text{O}_3$  än de övriga.

Tabell 4. Resultat av XRF-analys på material efter malning i 20 minuter. Endast de viktigaste elementen.

%	$\text{SiO}_2$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$
<b>Försök 1 - Tornio</b>	93,94	1,014	2,26	<0,070	1,084
<b>Försök 2 - Mårnes</b>	97,18	0,224	0,99	<0,070	0,294
<b>Försök 3 - Tana</b>	97,86	0,118	0,56	<0,070	0,188
<b>Försök 4 - Kvitnes</b>	97,42	0,255	0,96	<0,070	0,325

#### 4.4 Diskussion och slutsatser

Det krävs betydligt mindre malningsenergi att mala Tornio till sökta fraktioner (nära  $K_{80} = 60 \mu\text{m}$ ) än de övriga kvartsiterna. Kvartsiten från Mårnes och Kvitnes erfordrar mer malningsenergi än de andra att mala. Det är oklart exakt hur mycket energi som krävs, eftersom resultaten från de extra malningarna inte verkar stämma överens med de första malningarna. Analysresultaten av de extra malningarna är betydligt högre än förväntat, vilket tolkas som att det är fel på de extra malningarna. Analyserna på de extra malningarna bör göras om, samt nya ”extra” malningar borde göras för att härleda var felkällan finns.

Det är inte känt exakt vad som påverkar malbarheten hos kvartsit, eftersom det finns flera geologiska faktorer som särskiljer kvartsiten från Tornio gentemot de övriga. Kvartsiten från Tornio är betydligt äldre än de övriga, då den är över 2 miljarder år gammal, och de övriga är ca 400-600 miljoner år gamla. Den är finkornigare än de övriga, dess korngränser är mer komplexa, samt att metamorfosgraden är lägre.



Kvartsiten från Tornio har stor halt sericit i korngränserna, vilket kan medföra att kvartskornen lättare separerar från varandra. Kornstorleken på kvartsiten från Tornio är så fin att kornen oftast inte behöver sönderdelas utan endast särskiljas medans de andra kvartsiterna är grövre och därmed måste sönderdelas för att nå sökta fraktioner. Efter krossning innehöll Tornio större andel fint material vilket borde bidra till att det blir mer lättmalt.

Kvartsiten från Tornio har betydligt lägre halt av  $\text{SiO}_2$ , men högre halt av alkali- och aluminiumföreningar än de övriga. Kvartsiten från Kvitnes har högre halt av  $\text{SiO}_2$ , men högre halter av alkali och aluminium, än Mårnes. Tana har bäst resultat i XRF-analysen, med både högt  $\text{SiO}_2$ -värde och låga halter föreningar.

En annan felkälla kan ha varit neddelningen av det krossade materialet till poster på 1kg. Detta skedde i en ”karusell” där 10kg material spriddes jämnt i tio behållare. Problemet var att det ofta skiljde  $\pm 50$ gram i varje behållare vilket jämnades ut manuellt till 1kg.

#### 4.5 Rekommendationer för fortsatta studier

I detta arbete krossades kvartsiten tills ca 93% av materialet kunde siktas genom ett 0,8mm siktnät. Problemet med detta är att materialet på 7% som inte gick igenom nätet, fanns i stora fraktioner som sedan inte sönderdelades i malningen. Materialet borde krossas tills allt material är mindre än 1 mm. Ett alternativ hade varit att mala kvartsiten två gånger, först tillsammans med metallstänger som sönderdelar de grövsta kornen, och sedan med metallkulor.

Det skulle vara intressant att göra dubbla försök på varje kvartsit för att se om resultaten korrelerar, och för att ta reda på hur stor slumpvariabel det finns i neddelning, krossning och malning.

Det borde göras QEM-scan på proverna för att ta reda på vilka mineral som sänker halten  $\text{SiO}_2$ , speciellt då kvartsiten från Tornio ser väldigt ren ut i tunnslipen. Endast transparanta mineral har undersökts i mikroskop, och det är möjligt att Tornio har speciellt stora mängder opaka mineral.

Man bör ha i åtanke att antalet tunnslip och stuffer i detta arbete eventuellt kan vara för litet för att representera hela fyndigheten.

Fler maltider än de 4 som användes skulle ge en bättre bild av malningsegenskaperna, och analyserna från de extra malningarna i detta projekt bör göras om.

Kvartsiten bör även utsättas för metallurgiska tester.

Hos LKAB har projektet namnet KS2012-0121-M



## 5 Referenser

Fiquet, C. (2010), *Characterization and Comparison of New Limestone Additives for LKAB's Pellets According to Texture and Disintegration Properties*, Examensarbete, ISSN 1653-0187, Luleå: Avd. För malmgeologi, Luleå tekniska universitet

Kontturi, J. (2003), *Undersökning av tre dolomitområden i Kalkkimaadagbrott med speciellt hänseende till silikatoxidhalten*, Pro gradu-avhandling, Åbo, Institutionen för geologi och mineralogi, Åbo Akademi. Sid 23-32

Pettersson, M. (2006), *Undersökning av slaggfasers alkaliupptagningsförmåga i LKABs experimentmasugn*, Examensarbete, ISSN 1402-1617, Luleå: Avd. för Processmetallurgi, Luleå tekniska universitet

Philips, W., & Hinde, C. (2010, Februari), *Norway: A supplement to mining journal*, Tidsningsartikel, Mining Journal, Supplement.

Semberg, P. (2010), *Interactions Between Iron Oxides and the Additives Quartzite, Calcite and Olivine in Magnetite-Based Pellets*, Doktorsavhandling, ISBN 1402-1544, Luleå, Luleå tekniska universitet.

Sterner, T., Holme, K. & Johansson, L.-G. (2011), *Besöksrapport Kvitnes*

Suup, A. M. (2009), *Studie av kvartsits effekt på fasomvandlingarna under reduktion av magnetitpellets*, Examensarbete, ISSN 1402-1617, Luleå, Avd. för materialteknik, Luleå tekniska universitet

LKAB's hemsida, [www.lkab.se](http://www.lkab.se) [Tillgänglig 2012-04-25]

Mineral Information Institute: <http://www.mii.org/Minerals/photoquartzite.html> [Tillgänglig 2012-05-02]

Hanssen T., Kvitnes kvartsit. E-post 2012-04-08

Hugaas K.S., Elkem. E-post 2012-04-27

Johansson M., SMA Mineral. E-post 2012-04-13

Wanwik J.E., NGU. E-post 2012-04-25



## 6 Bilagor

*Bilaga 1: Siktanalyser från den krossade och malda kvartsiten. Värdena är ackumulativa.*

		Försök 1: Tornio					Försök 2: Mårnes				
		Utg. Kross	10 min	15 min	20 min	18 min	Utg. Kross	10 min	15 min	20 min	25 min 36 s
Sikt<4.0mm	%	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Sikt<2.8mm	%	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,90
Sikt<2.0mm	%	99,50	99,70	99,70	99,60	99,60	99,70	99,80	99,60	99,70	99,70
Sikt<1.4mm	%	96,90	97,20	97,20	97,80	97,50	97,70	98,50	98,20	98,60	99,20
Sikt<1.0mm	%	94,30	95,50	96,20	97,10	96,60	95,40	97,40	97,50	98,10	98,90
Sikt<710um	%	85,40	94,90	95,80	97,00	96,30	88,10	96,90	97,10	97,90	98,90
Sikt<500um	%	72,70	94,40	95,60	96,90	96,20	72,50	96,40	96,80	97,90	98,80
Sikt<355um	%	63,10	94,10	95,50	96,90	96,00	59,80	95,70	96,70	97,80	98,60
Sikt<250um	%	54,60	93,80	95,50	96,80	95,90	45,90	94,60	96,50	97,70	98,40
Sikt<180um	%	46,60	93,10	95,20	96,60	95,60	34,00	88,30	95,70	97,40	98,20
Sikt<125um	%	38,70	88,50	94,60	96,20	95,10	24,90	71,10	89,60	95,60	97,60
Sikt<90um	%	27,80	78,50	90,60	95,00	92,90	17,80	53,30	74,10	87,70	94,00
Sikt<63um	%	-	59,00	76,00	85,50	77,40	-	38,60	57,10	66,20	75,30
Sikt<45um	%	-	47,20	62,10	73,40	65,30	-	28,90	41,00	52,20	60,40
<b>K<sub>80</sub></b>	<b>µm</b>	<b>611,20</b>	<b>94,53</b>	<b>69,49</b>	<b>54,04</b>	<b>66,87</b>	<b>591,90</b>	<b>151,01</b>	<b>102,01</b>	<b>79,2</b>	<b>68,94</b>
		Försök 3: Tana					Försök 4: Kvitnes				
		Utg. Kross	10 min	15 min	20 min	22 min	Utg. Kross	10 min	15 min	20 min	24 min 36 s
Sikt<4.0mm	%	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Sikt<2.8mm	%	100,00	100,00	99,90	100,00	99,90	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Sikt<2.0mm	%	99,10	99,10	99,20	99,20	99,20	99,50	99,10	99,30	99,20	99,50
Sikt<1.4mm	%	95,20	96,80	97,20	97,40	97,90	98,20	97,10	98,30	98,40	98,70
Sikt<1.0mm	%	93,20	96,10	96,60	97,10	97,70	96,90	96,60	98,10	98,20	98,60
Sikt<710um	%	90,10	95,90	96,60	97,10	97,60	93,40	96,40	98,10	98,20	98,60
Sikt<500um	%	80,70	95,80	96,40	97,00	97,60	83,90	96,20	97,90	98,20	98,50
Sikt<355um	%	68,80	95,20	96,40	97,00	97,50	71,90	96,00	97,90	98,20	98,40
Sikt<250um	%	54,60	94,90	96,30	96,90	97,40	56,60	95,60	97,70	98,10	98,30
Sikt<180um	%	38,40	91,90	95,90	96,80	97,10	42,30	91,80	97,30	98,00	98,10
Sikt<125um	%	26,10	76,60	91,20	96,10	96,60	30,90	76,30	93,00	97,00	97,60
Sikt<90um	%	16,20	58,80	78,10	91,40	92,30	22,50	56,80	77,30	89,80	94,50
Sikt<63um	%	-	39,70	56,10	77,30	71,20	-	41,50	59,10	72,40	74,20
Sikt<45um	%	-	32,40	44,10	58,60	58,00	-	30,60	43,20	54,70	59,50
<b>K<sub>80</sub></b>	<b>µm</b>	<b>490,70</b>	<b>135,69</b>	<b>94,41</b>	<b>67,49</b>	<b>73,11</b>	<b>447,50</b>	<b>136,29</b>	<b>95,32</b>	<b>73,66</b>	<b>69,73</b>





*Bilaga 2: Resultat av XRF-Analys på den malda kvartsiten. De viktigaste parametrarna är fetmarkerade.*

		Försök 1: Tornio				Försök 2: Mårnes			
		10 min	15 min	20 min	18 min	10 min	15 min	20 min	25 min 36 s
Fe	%	1,39	0,85	0,99	1,01	0,51	0,62	0,71	0,78
P	%	0,012	0,008	0,009	0,005	0,008	0,008	0,008	0,007
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>%</b>	<b>93,81</b>	<b>94,51</b>	<b>93,94</b>	<b>95,54</b>	<b>97,37</b>	<b>97,34</b>	<b>97,18</b>	<b>95,31</b>
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>%</b>	<b>0,941</b>	<b>1,012</b>	<b>1,014</b>	<b>0,86</b>	<b>0,226</b>	<b>0,224</b>	<b>0,224</b>	<b>0,227</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2,09	2,22	2,26	1,85	1,01	1,01	0,99	1,02
CaO	%	0,11	0,09	0,1	0,19	0,05	0,05	0,05	0,08
MgO	%	<0,19	<0,19	<0,19	0,19	<0,19	<0,19	<0,19	0,09
MnO	%	0,05	0,06	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
TiO <sub>2</sub>	%	0,08	0,08	0,08	0,05	0,09	0,1	0,09	0,06
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0
CaO/SiO <sub>2</sub>	%/%	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO/SiO <sub>2</sub>	%/%	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO+SiO <sub>2</sub>	%	94	94,7	94,13	95,73	97,56	97,53	97,37	95,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,027	0,018	0,021	0,011	0,018	0,018	0,018	0,016
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>%</b>	<b>&lt;0,070</b>	<b>&lt;0,070</b>	<b>&lt;0,070</b>	<b>&lt;0,070</b>	<b>&lt;0,070</b>	<b>&lt;0,070</b>	<b>&lt;0,070</b>	<b>&lt;0,070</b>
<b>Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O</b>	<b>%</b>	<b>1,011</b>	<b>1,082</b>	<b>1,084</b>	<b>0,93</b>	<b>0,296</b>	<b>0,294</b>	<b>0,294</b>	<b>0,297</b>
FexOy	%	1,97	1,21	1,41	1,43	0,72	0,88	1,01	1,11
SumOx	%	99,35	99,47	99,14	100,24	99,78	99,91	99,85	98,01
		Försök 3: Tana				Försök 4: Kvitnes			
		10 min	15 min	20 min	22 min	10 min	15 min	20 min	24 min 36 s
Fe	%	0,61	0,72	0,77	0,84	0,9	0,96	1,00	1,29
P	%	0,006	0,006	0,006	0,005	0,015	0,015	0,016	0,014
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>%</b>	<b>97,86</b>	<b>97,47</b>	<b>97,86</b>	<b>96,13</b>	<b>96,95</b>	<b>97,24</b>	<b>97,42</b>	<b>95,13</b>
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>%</b>	<b>0,12</b>	<b>0,126</b>	<b>0,118</b>	<b>0,128</b>	<b>0,254</b>	<b>0,266</b>	<b>0,255</b>	<b>0,253</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,57	0,58	0,56	0,6	0,96	0,98	0,96	0,96
CaO	%	0,04	0,04	0,04	0,07	0,14	0,15	0,17	0,16
MgO	%	<0,19	<0,19	<0,19	0,04	<0,19	<0,19	<0,19	0,09
MnO	%	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03
TiO <sub>2</sub>	%	0,07	0,07	0,08	0,04	0,09	0,09	0,08	0,05
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
CaO/SiO <sub>2</sub>	%/%	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO/SiO <sub>2</sub>	%/%	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO+SiO <sub>2</sub>	%	98,05	97,66	98,05	96,17	97,14	97,43	97,61	95,22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,014	0,014	0,014	0,011	0,034	0,034	0,037	0,032
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>%</b>	<b>&lt;0,070</b>	<b>&lt;0,070</b>	<b>&lt;0,070</b>	<b>&lt;0,070</b>	<b>&lt;0,070</b>	<b>&lt;0,070</b>	<b>&lt;0,070</b>	<b>&lt;0,070</b>
<b>Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O</b>	<b>%</b>	<b>0,19</b>	<b>0,196</b>	<b>0,188</b>	<b>0,198</b>	<b>0,324</b>	<b>0,336</b>	<b>0,325</b>	<b>0,323</b>
FexOy	%	0,87	1,02	1,09	1,19	1,28	1,36	1,42	1,83
SumOx	%	99,84	99,62	100,07	98,32	100	100,41	100,64	98,62



*Bilaga 3: Resultat av XRF-analys på alla siktfraktioner på extra malningar.*

Försök 1: Tornio		Sikt<45um	Sikt<63um	Sikt<90um	Sikt<125um	Sikt<180um	Sikt<500um	Sikt<1,4mm	Sikt<2,0mm
Fe	%	0,71	0,35	0,39		4,65		0,35	
P	%	0,01	0,00	0,00		0,01		0,00	
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>%</b>	<b>96,07</b>	<b>97,19</b>	<b>97,06</b>		<b>89,41</b>		<b>95,41</b>	
K <sub>2</sub> O	%	0,86	0,57	0,61		0,66		0,86	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	1,87	1,07	1,13		1,41		1,94	
CaO	%	0,19	0,08	0,08		0,10		0,09	
MgO	%	0,17	0,09	0,09		0,16		0,17	
MnO	%	0,03	0,01	0,02		0,58		0,02	
TiO <sub>2</sub>	%	0,05	0,04	0,04		0,04		0,04	
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,01	0,00	0,01		0,01		0,00	
CaO/SiO <sub>2</sub>	%	0,00	0,00	0,00		0,00		0,00	
MgO/SiO <sub>2</sub>	%	0,00	0,00	0,00		0,00		0,00	
MgO+SiO <sub>2</sub>	%	96,24	97,28	97,15		89,57		95,58	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,01	0,01	0,01		0,01		0,01	
SumOx	%	100,27	99,55	99,60		98,99		99,04	
Fe_ber	%	0,52	0,66	0,67		5,36		1,03	
Försök 2: Mårnes		Sikt<45um	Sikt<63um	Sikt<90um	Sikt<125um	Sikt<180um	Sikt<500um	Sikt<1,4mm	Sikt<2,0mm
Fe	%	0,71	0,29	0,30	0,52	4,62	1,09		
P	%	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01		
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>%</b>	<b>97,80</b>	<b>98,30</b>	<b>98,60</b>	<b>95,32</b>	<b>88,10</b>	<b>97,97</b>		
K <sub>2</sub> O	%	0,14	0,20	0,27	0,71	0,82	0,14		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,68	0,91	1,23	2,87	3,31	0,55		
CaO	%	0,13	0,07	0,14	0,07	0,21	0,07		
MgO	%	<0,19	0,09	0,12	0,13	0,20	0,05		
MnO	%	0,02	0,01	0,01	0,02	0,45	0,11		
TiO <sub>2</sub>	%	0,06	0,06	0,06	0,08	0,09	0,04		
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01		
CaO/SiO <sub>2</sub>	%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
MgO/SiO <sub>2</sub>	%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
MgO+SiO <sub>2</sub>	%	97,99	98,39	98,72	95,45	88,30	98,02		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,02	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01		
SumOx	%	100,05	100,06	100,89	99,96	99,77	100,50		
Fe_ber	%	0,67	0,25	-0,32	0,55	4,78	0,74		



*Bilaga 3: Fortsättning*

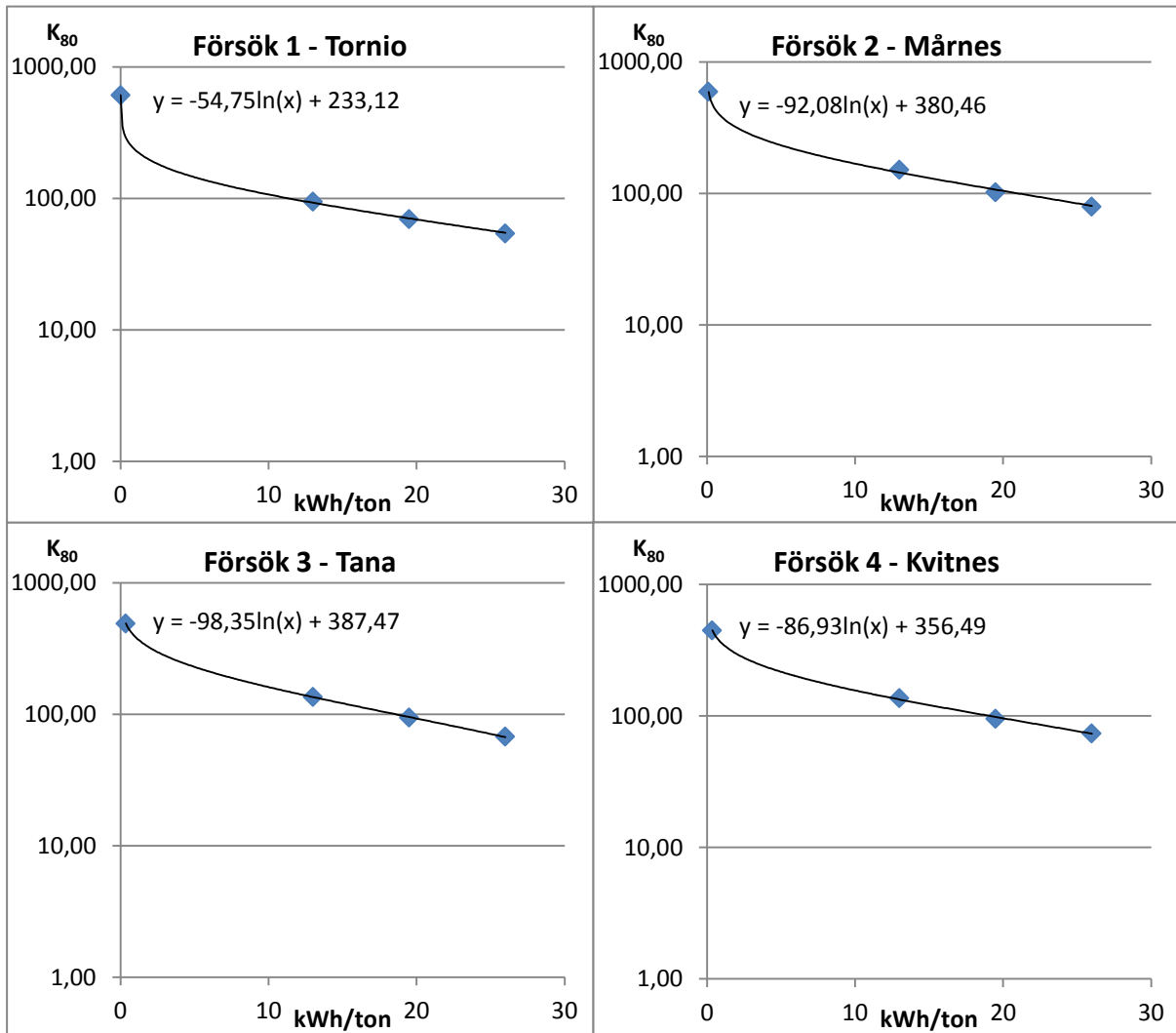
Försök 3: Tana		Sikt<45um	Sikt<63um	Sikt<90um	Sikt<125um	Sikt<180um	Sikt<500um	Sikt<1,4mm	Sikt<2,0mm
Fe	%	0,75	0,39	0,33	1,39				4,18
P	%	0,01	0,00	0,00	0,00				0,01
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>%</b>	<b>98,23</b>	<b>98,56</b>	<b>98,78</b>	<b>96,90</b>				<b>91,65</b>
K <sub>2</sub> O	%	0,10	0,06	0,07	0,11				0,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,45	0,26	0,27	0,46				0,53
CaO	%	0,15	0,06	0,06	0,07				0,13
MgO	%	<0,19	<0,19	<0,19	<0,19				<0,19
MnO	%	0,02	0,01	0,01	0,04				0,24
TiO <sub>2</sub>	%	0,05	0,03	0,03	0,03				0,05
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,01	0,00	0,00	0,00				0,01
CaO/SiO <sub>2</sub>	%	0,00	0,00	0,00	0,00				0,00
MgO/SiO <sub>2</sub>	%	0,00	0,00	0,00	0,00				0,00
MgO+SiO <sub>2</sub>	%	98,42	98,75	98,97	97,09				91,84
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,01	0,01	0,01	0,01				0,01
SumOx	%	100,28	99,73	99,88	99,78				98,86
Fe_ber	%	0,55	0,58	0,41	1,54				4,98

Försök 4: Kvitnes		Sikt<45um	Sikt<63um	Sikt<90um	Sikt<125um	Sikt<180um	Sikt<500um	Sikt<1,4mm	Sikt<2,0mm
Fe	%	1,09	0,61	0,47	0,78	4,29			1,86
P	%	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01			0,02
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>%</b>	<b>97,22</b>	<b>97,73</b>	<b>98,40</b>	<b>96,30</b>	<b>86,77</b>			<b>89,29</b>
K <sub>2</sub> O	%	0,19	0,24	0,23	0,54	0,45			0,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0,71	0,87	0,86	1,91	1,66			0,71
CaO	%	0,22	0,11	0,09	0,09	0,21			0,12
MgO	%	<0,19	<0,19	<0,19	<0,19	0,21			<0,19
MnO	%	0,02	0,01	0,01	0,02	0,48			0,01
TiO <sub>2</sub>	%	0,06	0,05	0,04	0,05	0,06			0,03
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01			0,00
CaO/SiO <sub>2</sub>	%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00
MgO/SiO <sub>2</sub>	%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			0,00
MgO+SiO <sub>2</sub>	%	97,41	97,92	98,59	96,49	86,98			89,48
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,04	0,02	0,01	0,01	0,03			0,05
SumOx	%	100,20	100,09	100,51	100,22	95,98			93,21
Fe_ber	%	0,95	0,55	0,11	0,62	7,12			6,64



*Bilaga 4: Beräkningar av maltider för extra malningar. Ekvationerna kommer från trendlinjer i scatterplotter i Microsoft Excell 2010.*

För att beräkna malningsenergin (kWh/ton) som erfordras för att mala kvartsiten tills dess att 80% av partiklarna är mindre än 60 µm, plottas  $K_{80}$  värden från siktanalyserna i scatterplotter, diagram 4 nedan. En trendlinje ritas upp och dess ekvation används för att ta fram malningsenergin.



**Diagram 4. Scatterplotter med  $K_{80}$ -värden från siktanalyserna ställda mot malningsenergin. En logaritmerad trendlinje och dess ekvation är insatt.**

Malningsenergin fås genom att bryta ur X ur ekvationerna i diagram 4 ovan, och låta  $Y=60$  eftersom vi söker  $K_{80}=60$ . För att få malningsenergin i minuter och sekunder delas den med faktorn 1,3. K. Taavoniku, LKAB, beräknade den erforderade malningsenergin med papper och penna, och det är dessa värden som används vid de extra malningarna. Scatterplottarna i diagram 4 användes för att kontrollera K. Taavoniku's värden, och värdena var korrekta.



*Bilaga 4: Fortsättning*

		<b>Insättning y=60, samt bryter ut X</b>	<b>Omvandling kWh/ton till minuter</b>	<b>Resultat</b>
<b>Försök 1 - Tornio</b>	$y = -54.75 \ln(x) + 233.12$	$x = e^{((233.12-60)/54.75)} = 23.618 \text{ kWh/ton}$	23.618/1.3	18 min 17 sek
<b>Försök 2 - Mårnes</b>	$y = -92.08 \ln(x) + 380.46$	$x = e^{((380.46-60)/92.08)} = 32.47 \text{ kWh/ton}$	32.47/1.3	25 min
<b>Försök 3 - Tana</b>	$y = -98.35 \ln(x) + 387.47$	$x = e^{((387.47-60)/98.35)} = 27.93 \text{ kWh/ton}$	27.93/1.3	21 min 29 sek
<b>Försök 4 - Kvitnes</b>	$y = -86.93 \ln(x) + 356.49$	$x = e^{((356.49-60)/86.93)} = 30.29 \text{ kWh/ton}$	30.29/1.3	23 min 18 sek