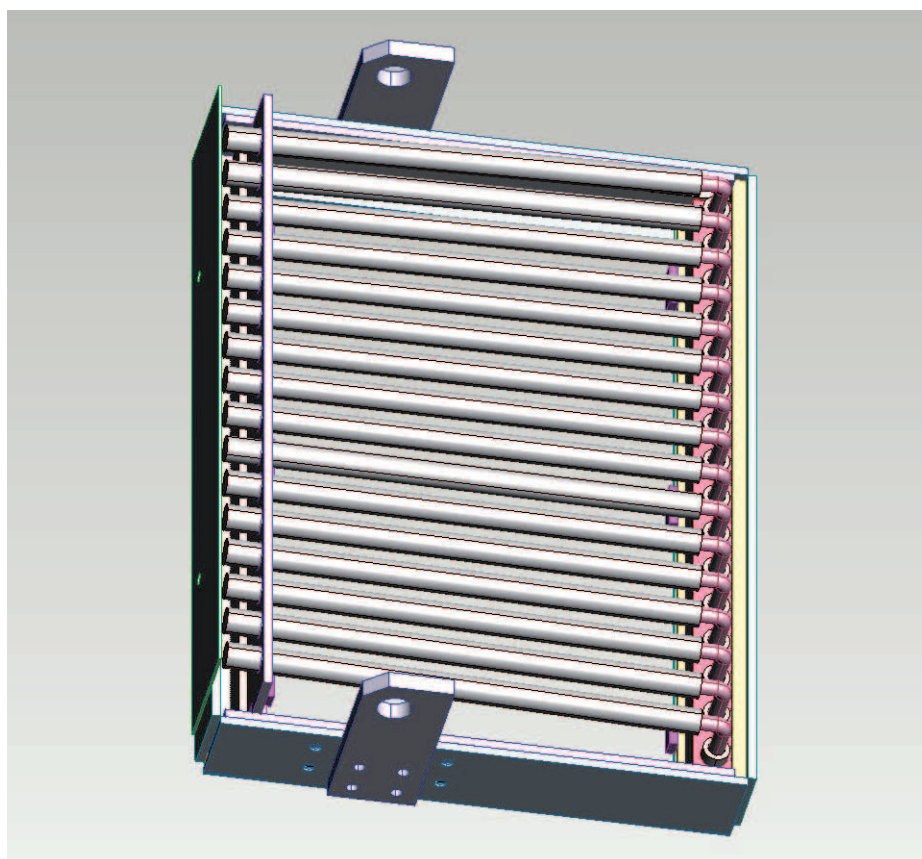


# Utveckling av Pebblessikt vid LKAB:s Anrikningsverk i Kiruna



INGEMAR HANSSON

**CIVILINGENJÖRSPROGRAMMET**  
**Maskinteknik**

Luleå tekniska universitet  
Institutionen för Tillämpad fysik, maskin- och materialteknik  
Avdelningen för Produktionsutveckling



## **FÖRORD**

I Civilingenjörsutbildningen i Maskinteknik vid Luleå Tekniska Universitet ingår ett examensarbete omfattande 20 högskolepoäng. Denna rapport är ett resultat av detta examensarbete. Arbetet med flerfaktorförsök applicerat på Pebbles processen vid Anrikningsverket i Kiruna har utförts för att öka kunskaperna inom process styrning. Konstruktions arbetet gjordes med avseende på ett effektivt underhåll av de sk. Pebbles siktarna vid samma verk.

Jag vill tacka min handledare Hans Engström vid avdelningen för produktionsteknik, och Kenneth Sennland samt Jan Fors vid Anrikningsverket i Kiruna för stöd och råd under arbetet.

Kiruna den 15 augusti 2006

Ingemar Hansson

## SUMMARY

There are two sieves which sorts grinding stones for the head process at LKAB: s enrichment plant in Kiruna. Those sieves are exposed to severe wear. This report suggests a new sieve design to achieve more wear resistance. The dominating wear mechanism is erosion by sliding and impact. The abrasives speed and the angle of impact, in addition to the hardness of the material is the most important factors by the theory of wear. There are two rubber carpets under the sieve bars in the new design, in order to reduce the impact energy. A harder steel, 34CrNiMo6 is proposed for the bars and they are free to rotate axially, because contact by rolling is preferred instead of sliding. For brittle materials and erosion conditions, maximum wear rate is achieved when the impact angle is normal to the face of the abraded material. To avoid severe wear, there are several holes in the sieve frame for the impact angle adjustment with the suspension device.

There are some problems with high bearing pressures in the head process mills. This report proposes an investigation by a two level fractional factorial design, to optimize the crumbling in the mills. The goal is to maximize the production and minimize the bearing pressure, with retained quality. A half reduced factorial design with four factors is made in Microsoft Excel for this purpose. In this case, the half reduction means that the experiments can be done in eight runs instead of sixteen, as with a full design. The disadvantages of lost information in reduced designs are often compensated by economic reasons, and the possibility to early sort out many factors of no interest. When the factorial experiments are done, a linear model of the process behaviour is achieved.

Finally, one can state the fact, that it is better to use a suited program for factorial designs rather than Excel. Some reasons for that are automated diagrams for normal plots, and statistical analyzes.

## SAMMANFATTNING

Vid LKAB:s Anriktningsverk i Kiruna finns två siktare som sorterar malsten till huvudprocessen. Dessa siktare utsätts för stor nötning. Examensarbetet går ut på att ge ett förslag och ritningsunderlag i Autocad på en förbättrad siktkonstruktion med avseende på underhållet av dessa. Den dominerande nötningmekanismen vid siktarna är erosion, med inverkan av såväl stöt som glidning. Teorin för nötning säger att abrasivets hastighet, det nötta materialets hårdhet, anslagsvinkeln och kontakt typen är de faktorer som har mest betydelse. Den nya konstruktionen innebär förändringar som innefattar dämpning av anslagsenergin, minskad anslagsvinkel och ett hårdare material i sikt gallren. Dämpningen sker genom att en gummimatta monteras under de rörliga gallerinfästningarna, samt att sikten tillåts vicka när godset lastas på. Anslagsvinkeln kan ställas in med de flyttbara upphängningsöglorna för sikten. Det befintliga materialet i sikt gallren är S355JR och föreslås bytas ut till 31CrNiMo6 eftersom ökad hårdhet i allmänhet medför bättre nötningens beständighet. Sikt gallren är lösa och kan rotera kring sin egen axel vilket bör minska på nötningen eftersom rullkontakt är att föredra framför glidkontakt mellan abrasiv och nött material.

Det är också problem med för högt lagertryck i huvudprocessens kvarnar, med hänsyn till producerad mängd anrikat gods. En begränsande faktor vid malande av gods i huvudprocessen är det höga lagertrycket. En frågeställning är om det går att köra processen på ett mer optimalt sätt för att få mer gods genom kvarnarna utan att kvaliteten försämras. I denna rapport föreslås att man med flerfaktorförsök i två nivåer utreder de olika processvariablernas inverkan på lagertryck, godsmängd och kvalitet. På det sättet är det möjligt att sortera ut ointressanta faktorer, och upprätta en linjär regressionsmodell för processen. Denna rapport beskriver hur man kan genomföra dessa försök i Microsoft Excel. Försöksplaner är upprättade för experiment med 4 faktorer i två nivåer. Eftersom det är dyrt att genomföra dessa vid en process som denna körs de med halv reducering. Det innebär att man endast behöver köra åtta försök, jämfört med sexton vid full plan. Slutligen kan man konstatera att det hade varit lättare att använda ett anpassat statistikprogram för att upprätta och ev. genomföra försöken. Anledningen till detta är bl.a. att man får färdiga diagram och analyser ur experimenten. Dessutom finns hjälpfunktioner för försöksplanering i program som ex. STATGRAPHICS, vilket saknas i Excel eftersom det är ett program för mer allmänna ändamål.

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

INLEDNING.....	5
MÅL OCH AVGRÄNSNINGAR.....	6
PROJEKT GENOMFÖRANDE.....	7
SIKTKONSTRUKTION.....	8
PROCESSOPTIMERING MED FLERFAKTORFÖRSÖK.....	18
INSTRUKTION FÖR FAKTORFÖRSÖK.....	19
RESULTAT.....	30
.DISKUSSION.....	31
SLUTSATS.....	32
REFERENSER.....	33

---

---

---

## INLEDNING

---

Vid LKAB:s Anrikningsverk i Kiruna, finns två siktar som sorterar malsten eller sk. *Pebbles* till den primära pellets processen. Det grövre materialet används som malsten, och den mindre fraktionen siktas till Minelco som använder den till special produkter.

Eftersom de ingående komponenterna utsätts för kraftig nötning, så har dessa siktar ett stort underhållsbehov. Tillverkningen av slit detaljerna vid underhållet av siktarna är såväl personal som tids krävande. Siktens funktion blir nedsatt pga. stockning, och stängerna i siktgallren lossnar eller nöts snabbt ner.

På grund av detta uppnås inte optimal produktion i den primära pellets processen. Detta eftersom storleken på *Pebblesen*, dvs det utsiktade material som används som malsten, påverkar både energitillförseln till kvarnarna och effektiviteten hos malningen.

Frågeställningen, med hänvisning till ovanstående är:

1. Hur optimerar man den sk. *Pebbles* hanteringen så att man får en effektivare malningsprocess?
2. Hur minskar man underhållsbehovet på siktarna?

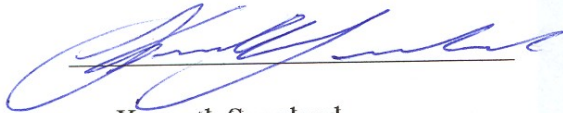
## Måldokument

Examensarbete

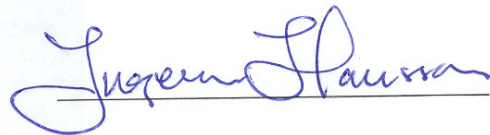
Utveckling av Malmpebbles sikt

1. Arbetet går ut på att ge konstruktions underlag för en förbättrad Pebbles sikt i KA2, med avseende på effektivt underhåll för LKAB:s egen personal. Byte av siktelement skall kunna göras under pågående drift utan att äventyra person säkerheten.
2. Upprätta färdiga försöksplaner med instruktioner för tvåfaktorförsök i EXCEL, för att optimera Pebbles processen inom KA2, med avseende på effekt och lagertryck i Pebbleskvarnen, och om det är praktiskt och ekonomiskt möjligt genomföra försöken.

Kiruna 2005-10-21



Kenneth Sennland  
Handledare LKAB



Ingemar Hansson  
LTU

---

## PROJEKT GENOMFÖRANDE

---

Med hjälp av en litteraturstudie identifierades de nötnings typer som är dominerande i Pebbles siktarna. Litteratur studien visade på åtgärder för att teoretiskt minska på nötningen och medförde en ny sikt konstruktion. Den nya sikten anpassades också till kraven på ett effektivt underhålls arbete på densamma. En aspekt på detta är, att de ingående detaljerna byggs upp av enkla standard komponenter, och att underhållet klaras av på plats med LKAB:s ordinarie personal. Vid konstruktions arbetet har jag använt ett CAD program som heter PRO Desktop, en enklare version av den mer kända PRO Engineer. För att uppfylla LKAB:s önskemål om att få ritningarna på Autocad format, har filerna sedan omvandlats till \*.dwg filer.

Det gods som kommer till Pebbles siktarna tas ur berget, som av naturliga skäl varierar i hårdhet och material analys. På grund av detta återfinns stora variationer i storlek, mängd och hårdhet hos det gods som kommer till siktarna. Det är därför inte meningsfullt att försöka mäta eller beräkna de olika koefficienterna i formlerna för nötning. Jag har istället fört ett kvalitativt resonemang utifrån dessa formler för att komma fram till föreslagen sikt konstruktion.

Genom att upprätta försöksplaner för *flerfaktor*försök med två nivåer i Excel, hoppas vi kunna styra Pebbles hanteringen för att minska lagertrycket i kvarnarna, som är en begränsande faktor i processen. Anledningen till att vi använde Excel i stället för något anpassat statistik program är att Excel är allmänt känd och lätt tillgänglig.



---

## SIKTKONSTRUKTION

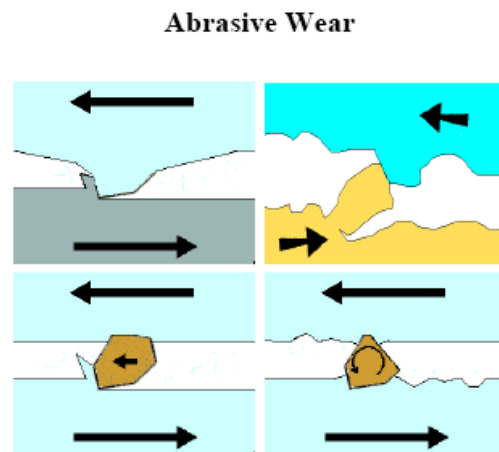
---

### IDENTIFIERING AV NÖTNINGS TYPER

Med Abrasiva nöttningsmekanismer menas alla mekanismer där hårda partiklar eller eggar orsakar skada i en enda rörelse. Skadan eller nötningen som de orsakar är i allmänhet av två typer.

Den första är deformation, och den andra är formation av partiklar eller spånor och avlägsnande av material. R.G.Bayer(1994, s 23)

Enligt Raymond.G.Bayer (2004a,s 85) definieras abrasiv nötning som nötning orsakade av hårda partiklar och utbuktningar. Abrasion och Erosion är två termer som används för att beskriva abrasiva nöttnings situationer. Dessa situationer är illustrerade i figur 1.



Figur 1. Övre bild raden beskriver tvåkroppars abrasion, medan nedre visar trekroppars abrasion.  
Referens: Internet <http://www.gordonengland.co.uk/wear.htm>

Tre kropps abrasion är när lösa partiklar som rör sig mellan två ytor orsakar nötning på dessa. Exempel på detta nötningförlopp är när sand eller andra partiklar kommer in i ett roterande lager.

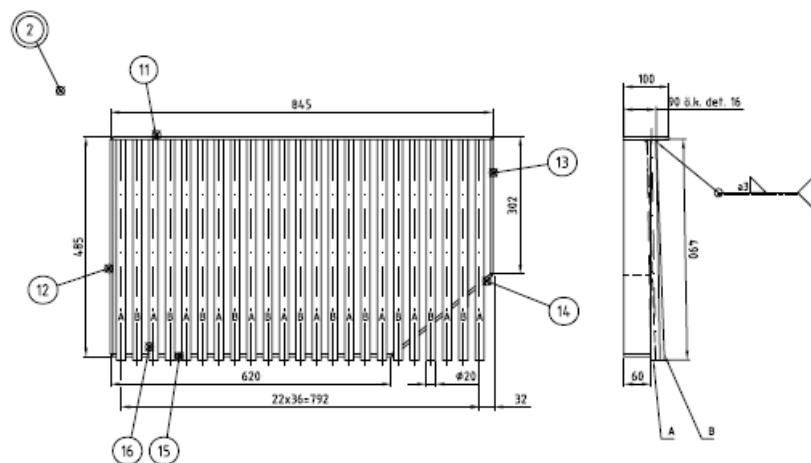
Begreppet Erosion används när man talar om nötning där endast en yta är involverad. Erosion orsakad av slam eller fasta partiklar är vanligt förekommande, och uppträder när en ström av partiklar, eller en fluid innehållande partiklar träffar en yta som sedan nöts. Ett exempel på detta är nötning i rör där något medium transporteras.

När två ytor är involverade i nötning, så talar man generellt om abrasion. I det särskilda fallet kan man definiera såväl två, som tre kropps abrasion.

Två kropps abrasion är när nötningen orsakas av att utbuktningar eller hårda partiklar fixerade vid en yta glider mot en annan yta. Filning och slipning är exempel på denna nötningstyp.

När det gäller Pebbles siktarna på anrikningsverket, kan man direkt identifiera Erosion. Strömmen av malsten som faller ned på sikten, kommer i kontakt med gallret både genom stöt och glidning.

Dessutom kan man se att svängningarna i de fastsvetsade siktgallren, som uppkommer av de periodiska stötarna från pålastat gods, även innebär en situation med tre kropps abrasion. Detta sker genom att den mindre fraktionen passerar mellan de svängande gallren, ritad som pos. 16 i figur 2.



Figur 2. Pebblesikt

## NÖTNINGSMEKANISMER

Enligt R.G.Bayer (2004),) *Engineering design for wear*.

Man har funnit att en eller flera av följande ekvationer kan beskriva abrasiv nötning.

$$V=KPS \quad (1.1)$$

$$V = \frac{KPS}{\rho} \quad (1.2)$$

$$V = \frac{KPS}{\rho^n} \quad (1.3)$$

I dessa ekvationer är  $V$  den avnötta volymen,  $P$  är normalkraften,  $S$  är glidsträckan och  $\rho$  är hårdheten.  $K$  är en nötningskoefficient som bestäms empiriskt. Ekvation (1.1) är den mest allmänna. Den är applicerbar på de flesta material system, oberoende av den relativa hårdheten mellan den nötta ytan och abrasiven. Den gäller för såväl två som tre kropps abrasion.

Ekvation (1.2) kan användas på alla material system och typer av abrasion där abrasivet är hårdare än den avnötta ytan.

Den sista ekvationen (1.3) används när hårdheten på den nötta ytan är hårdare eller lika stor som hårdheten hos abrasivet. Försök har visat att när hårdheten är lika stor så är  $n$  ungefär 10. När ytan är hårdare är  $n$  cirka 5.

R.G.Bayer (2004a, s 90) skriver att nötningskoefficienten  $K$  varierar stort, men att det finns en antydning till trend. Denna trend visar på att tre kropps abrasion, har mindre värden på  $K$  än två kropps abrasion. Förklaringen till detta är att i tre kropps fallet, är de abrasiva kornen fria att röra sig mellan ytorna, och därför inte alltid orsakar någon nötning. Exempelvis kan kornen börja rulla, i stället för att glida och skära ett spår i materialet. Kornen kan också orientera sig själv så att den trubbigaste ytan kommer i kontakt med ytan.

Vid erosion pressas inte partiklar mot ytan som i fallet med abrasion. Kraften mellan ytan och den enskilda partikeln är av impuls typ, och kan beskrivas med hjälp av rörelse energin hos partikeln. På grund av denna skillnad mellan abrasion och erosion, är det nödvändigt att modifiera de tidigare ekvationerna som beskriver abrasion.

Det första steget är att räkna om normal kraften till friktions kraft:

$$F = \mu P \quad (2.1)$$

Då blir ekvationen på formen:

$$V = \frac{K(Fx)}{\mu \rho} \quad (2.2)$$

Där produkten  $Fx$  representerar energin som går åt till glidning under stöten. Den totala kinetiska energin hos en ström av partiklar med total massa  $M$ , och partikel hastighet  $v$  ges av:

$$E = \frac{Mv^2}{2} \quad (2.3)$$

Som ett resultat av kollisionen mellan partikeln och ytan, åtgår en andel  $\beta$  av energin  $E$  till deformations arbete vid nötningen. Sätter man andelen lika med  $Fx$  får man slutligen följande uttryck för avnött volym.

$$V = \frac{K\beta Mv^2}{2\mu \rho} \quad (2.4)$$

Vid erosion har man funnit att anslags vinkeln mellan det abrasiva mediet och ytan påverkar nötningshastigheten. I figur 3. kan man se att vinkelns effekt på avverknings hastigheten är olika för duktilt och sprött material. För spröda material gäller att maximal erosions hastighet uppstår vid en vinkel som är normal mot ytan, medan duktila material nöts mest vid små angrepps vinklar. Denna skillnad kommer av de dominerande deformationer och skade mekanismerna hos dessa material. En generell regel är att spröda material har större sannolikhet att spricka vid stötar som angriper i ytans normal riktning än duktila material. Sprödbrott accelererar därigenom skärförloppet vid erosionen.

Hos duktila material dominerar material avverkningen av skärning och skavning, medan sprödbrott har mindre betydelse.

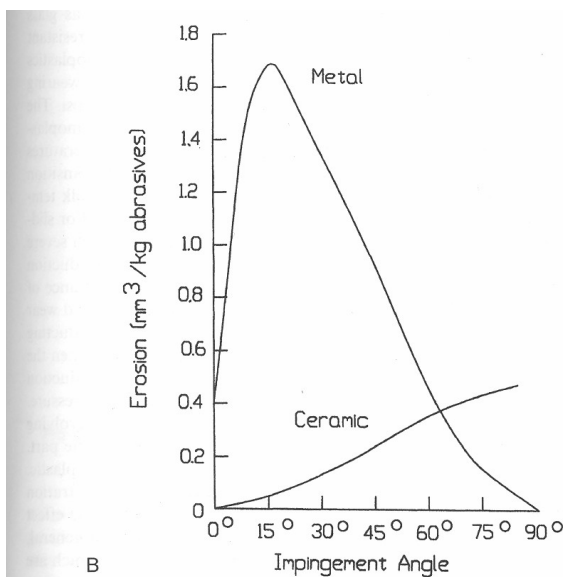


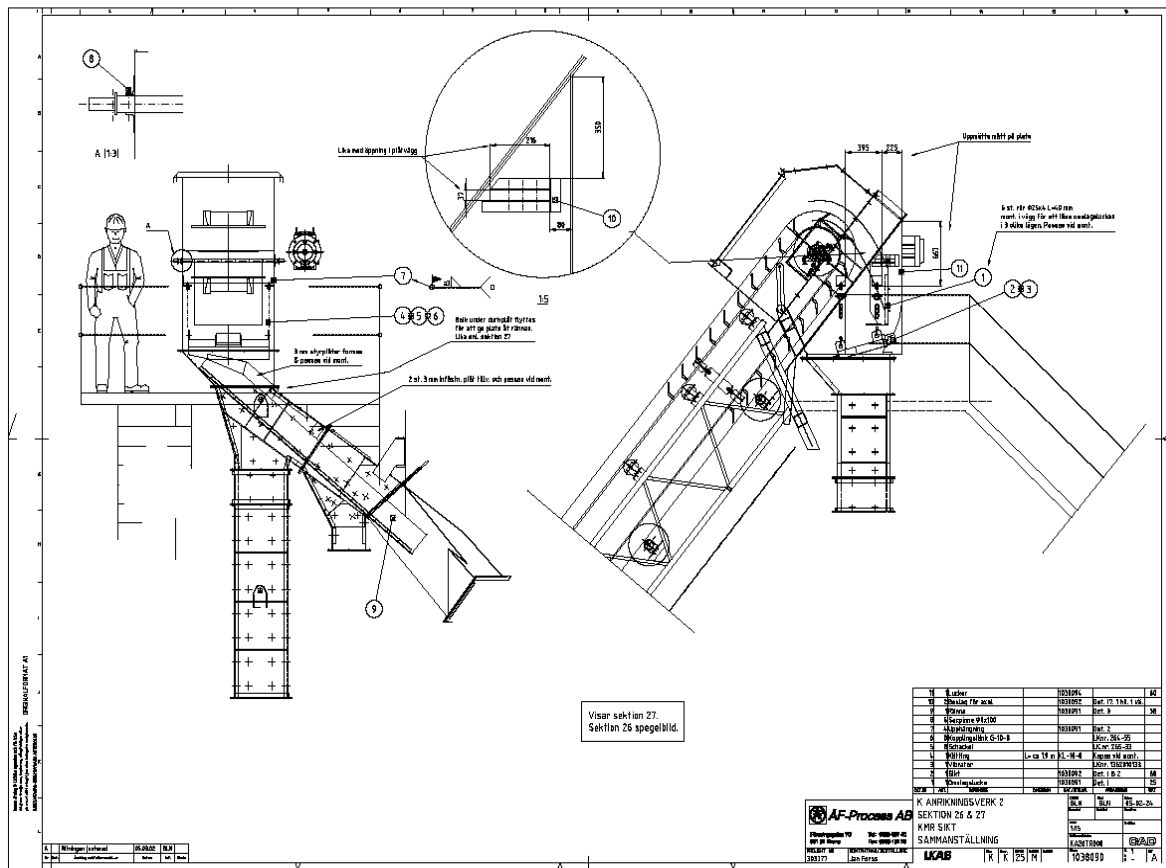
Figure 1.4 Examples of trends in wear resistance under abrasive conditions, "A", and erosion conditions, "B". (From Ref. 21.)

Figur 3. Angreppsvinkelns inverkan på nötningen.

Ur Engineering design for wear. Raymond.G.Bayer. ISBN: 0-8247-4772-0

## ÅTGÄRDER FÖR ATT MINSKA NÖTNINGEN

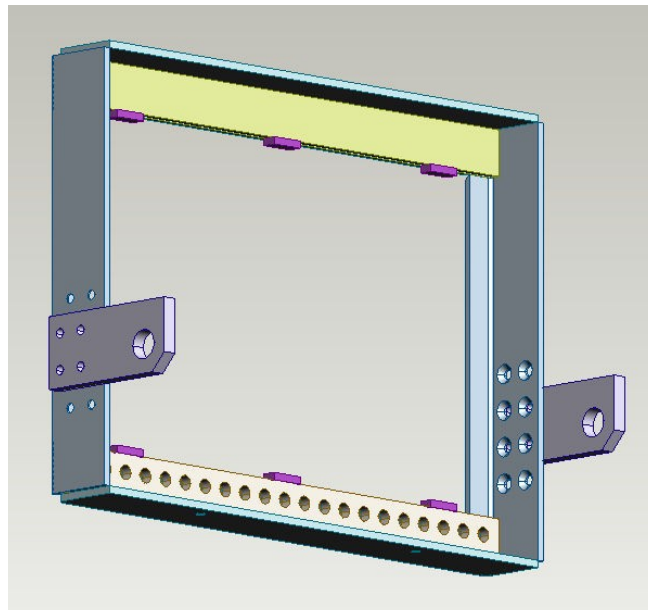
Den dominerande nötnings typen som angriper siktgallren är erosion. Av ekvation (2.4) för erosion kan man se att partiklarnas hastighet inverkar kvadratisk på avnött volym. Hastigheten kan man inte påverka med mindre än att man bygger om hela det befintliga sikt systemet, se fig 4. Det skulle krävas att vertikaltransportör, sikt och därtill tillhörande stup anpassas till varandra med avseende på fallhöjd, godshastighet och godsets angreppsvinkel på sikten. Detta skulle bli en dyr lösning, eftersom man förutom kostnader för den nya konstruktionen, skulle få ökade kostnader för traktor inlastning eller stillestånds kostnader för anrikningsverket.



Figur 4. Vertikaltransportör och siktram pos(2), med stup för grovt och fint gods.

## DÄMPNING

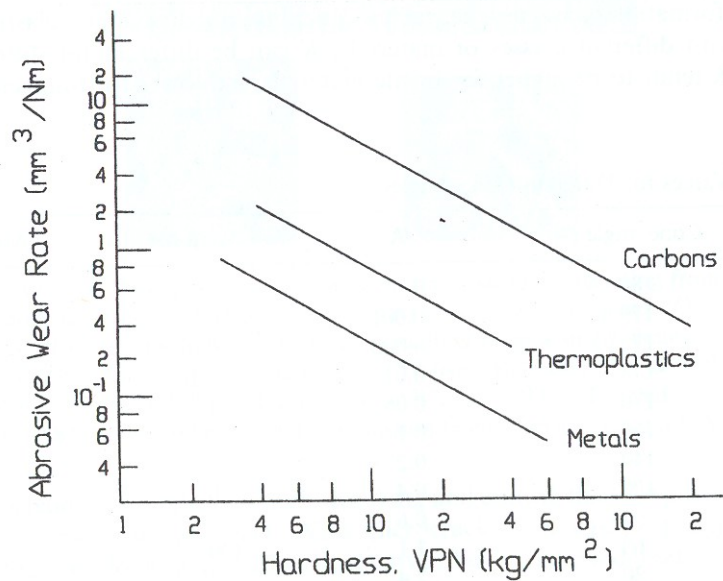
För att minska på hastighetens inverkan vid kollisionen mellan gods och sikt, föreslås att siktgallrens infästningsanordningar dämpas i såväl fram som bakkant. Dämpningen utgörs av en gummiduk som placeras under de rörliga infästningarna. Siktramen som håller upp hela sikten var tidigare upphängd med kätting i fyra punkter. Den nya sikt konstruktionen enligt fig. 5, är upphängd i två punkter för att kunna vicka lite när godset lastas på. Detta bör medföra att anslags energin dämpas ytterligare.



Figur 5. Dämpning med justerbar siktupphängning, samt gummi mattor (i gult och beige) på botten av siktramen.

## MATERIALVAL

En vanlig metod för att komma tillrätta med abrasiva nötningssituationer är att, se till att ytan som utsätts för nötning är hårdare än det abrasiva mediet. Enligt figur 6, kan man minska den avnötta volymen med en till två tiopotenser genom att använda ett hårdare material. Siktgallren var tidigare gjorda av allmänt konstruktionsstål, i den nya sikten föreslås att gallren tillverkas i seghärdat stål. Hårdheten är HB (300-355) för seghärdat 31CrNiMo6, jämfört med HB (150-190) för stålet S355JR.



Figur 6. Inverkan av Materialets hårdhet på nötningen. Från Raymond. G. Bayer. (2004b) *Engineering design for wear*.

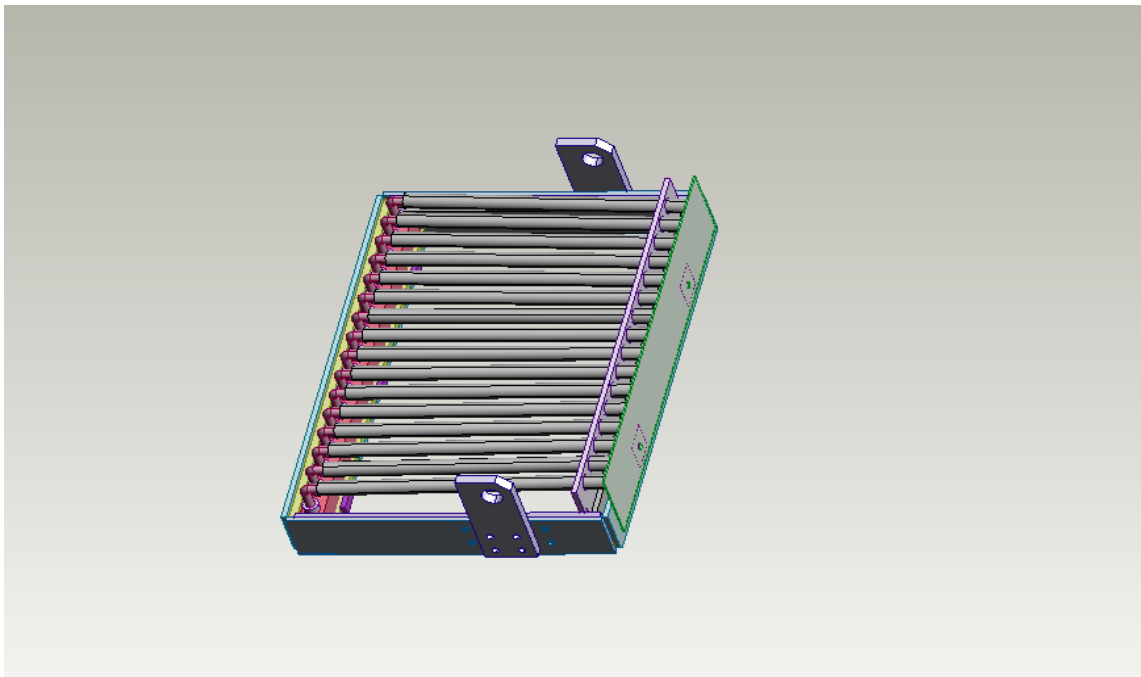


## ANGREPPSVINKEL

I figur (3) utläses att gods strömmens angreppsvinkel mot den nötta ytan påverkar nötningshastigheten. För spröda material gäller att maximal nötning nås vid en vinkel som är normal mot ytan. I den nya konstruktionen finns flera infästningslägen för justering av angreppsvinkeln. Vinkeln minskar om upphängningsfästet placeras längre bak relativt gods strömmen.

## GLIDKONTAKT - RULLKONTAKT

Teorin för två kontra tre kropps abrasion, visar att nötningskonstanten  $K$  är mindre vid tre kropps abrasion. Detta beror i korthet på att rullkontakt är fördra framför glidkontakt med hänsyn till avnött volym. I det nya siktförslaget, fig.(7) tillåts gallren att rotera runt sin egen axel, även om man inte uppnår full rullkontakt bör åtgärden inverka positivt på nötningen.



Figur 7. Sikt med galler som kan rotera kring sin egen axel.

## SIKT UNDERHÅLL

I den nya sikt konstruktionen förväntas den mesta nötningen ske på siktgallren, dessa är upp hängda så att de är utbytbara, man skruvar lös två skruvar i den bakre lås plåten och drar ut dem vid byte. Man kan också förvänta sig att gallrens främre upphängningsanordning slits. De är konstruerade i bockad rundstång och ligger löst i siktens framände, vid byte av galler plockar man ut dem vid behov. Dessutom finns risk att bakre upphängningsplåten för gallren slits i hålen, vid behov byter man plåten för hand.

Detaljerna är valda i standard material, med hänsyn till enkel tillverkning som man bör klara av i den sk. Service hallen på anriktningsverket med LKAB:s ordinarie personal.

## 2.1 FÖRSÖK MED 4 FAKTORER I 2 NIVÅER

ur Douglas.C.Montgomery(2003) *Design and analysis of experiments*.

Vid LKAB: s anrikningsverk i Kiruna, används s.k. Pebbles som malsten vid malning av primärt malmhaltigt gods. En begränsande faktor i malnings processen är lager trycket i kvarnarna. I syfte att försöka optimera processen och minska på lagertrycket utan att minska produktionen, redovisar denna rapport planer för sk. *Flerfaktor försök* i Excel.

Fördelen med att använda Flerfaktor försök där man varierar flera variabler samtidigt med varandra, i stället för att variera en faktor i taget och låta övriga vara konstanta, är att man kan hitta eventuella samspelseffekter mellan faktorerna.

Planer är upprättade för att studera exempelvis lagertryck eller effekt i kvarnen, med avseende på fyra ingående variabler. Dessa variabler kan förslagsvis vara *Pebbles matningen* med hänsyn till godsets storlek och mängd, samt andel och mängd *Primärkoncentrat* och *spädvatten*. Andra faktorer kan vara inställningar för *Malstensficken* och den sk. *Gallerplattan* samt *storleken på maskorna i Trommelsikten*. Genom att använda tidigare inarbetad kunskap om processen, finns möjligheter att resonera sig fram till vilka faktorer som eventuellt kan vara av betydelse för det studerade utfallet, innan försöket utförs.

Eftersom det är dyrt att bedriva experiment vid en process som denna, är försöksplanerna utförda med halv reducering samt endast ett replikat. Det betyder bla. att vid försök med fyra ingående variabler, körs åtta experiment med olika inställningar för variablerna, jämfört med 16 experiment vid fullt försök. Vid reducering förlorar man en del information, men det uppvägs oftast av vinsten med att tidigt sortera ut de variabler som inte är intressanta. De variabler som blir kvar, kan sedan överföras till ett oreducerat system genom s.k. *projektion*.

Allmänt gäller att: om vi har endast ett replikat i en  $2^k$  design, dvs två nivåer och  $k$  faktorer och halv reducering, där  $b$  stycken variabler ramlar ut som ointressanta, att man ur originalplanen kan *projicera* försöket till en fullständig två nivåers plan med  $k-b$  faktorer och  $2^b$  replikat.

Den sk. Projektionen görs helt enkelt genom att utesluta en eller flera faktorer som i försöken visat sig vara ointressanta, de faktorer som är kvar i försöksplanen är då körda med flera försök vid samma inställning, och utgör därför replikat.

På detta sätt skapar man underlag för att göra en varians analys över spridningen vid försöken. I händelse av att man inte har något replikat, är en grafisk normalplot där effekterna plottas mot medelrangen, den vanligaste metoden att bedöma vilka faktorer som är intressanta. Strategin är, att man grafiskt skall kunna bedöma vilka faktorer som sannolikt tillhör en normalfördelning, vilka då inte kan påvisas ha någon betydelse, eftersom spridningen kan komma ur en naturlig variation.

Det finns även andra statistiska modeller som dock inte redovisas här, där man genom beräkning föreslår aktiva effekter, en sådan är Lenth:s metod.

---

## INSTRUKTION FÖR FAKTORFÖRSÖK

---

### 2.2 FÖRUTSÄTTNINGAR:

A: De ingående faktorerna skall vara bestämda till två fixerade lägen, ett *högt* och ett *lågt*.

B: Kör ordningen för de olika inställningarna måste vara fullständigt randomiserade.

C: Ett antagande om att förhållandena kan beskrivas med en normal fördelning, måste vara tillgodosett.

D: Eftersom det bara är två nivåer på faktorerna, antar vi att responsen är approximativt linjär för de givna intervallen på de valda faktorerna. I händelse av att detta inte är fallet kan man bygga ut försöket med sk. Centrumpunkter.

### STEG 1. VAL AV DE FAKTORER SOM SKALL STUDERAS.

Man börjar med att fastställa den respons som skall studeras, genom process kännedom listar man sedan de ingående faktorerna som kan inverka på responsen.

Av praktiska skäl utgår man vanligen från de nivåer på faktorerna, som är vanliga vid normal körning i processen. Detta värde är lämpligt att ha som utgångs eller mittpunkt, då man bestämmer *hög* och *låg* nivå. Sedan väljer man tex. den låga nivån med hänsyn till vad som är praktiskt möjligt, eller man vågar köra i processen. Den höga nivån bör till beloppet motsvara ett lika stort avsteg från utgångspunkten som den låga nivån. Det är viktigt att nivåerna väljs på ett tillräckligt stort avstånd från det normala process värdet då man utför försöken. Anledningen till detta är att man bör säkerställa ett tillräckligt stort utslag i responsen när experimentet utförs.

### 2.3 STEG 2 VAL AV DESIGN.

Vid val av design utgår man från vilka krav man har på den information som önskas. Ett fullt försök med många faktorer är ofta dyrt och tidskrävande att genomföra. Vanligtvis startar man med en reducerad design för att på ett tidigt stadium kunna sortera bort faktorer som är ointressanta.

I denna rapport redovisas försöksplaner med fyra ingående faktorer. Exemplet nedan är en design med 4 faktorer och halv reducering, där faktorerna är benämnda A, B, C, och D.

Tabell 1. *Försöksplan* med 4 ingående faktorer Douglas.C.Montgomery(2003) *Design and analysis of experiments*..

Nr.	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
3	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1
4	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1
5	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

### STEG 3 VAL AV FAKTORNIVÅER

I tabell 1 visas inställningarna för de fyra olika nivåerna inkluderande två och trefaktorsamspel. Låg nivå motsvaras av ett negativt värde (- 1) och hög nivå av endast ( 1).

Låt oss anta att ett vanligt värde för faktor A är 50 vid normal körning av processen, detta värde fungerar då som utgångspunkt vid val av hög respektive låg nivå. Ett värde på den låga nivån bestäms i detta exempel godtyckligt till 30 i någon enhet. Det skulle medföra att ett lämpligt värde på den höga nivån för A motsvaras av ett värde på 70 enheter.

### STEG 4 UTFÖRANDE AV FÖRSÖKEN

Lägg märke till att *försöks nummer* och *kör ordning* vid experimentens utförande inte är samma sak. Det är ett absolut krav att man fullständigt randomiserar kör ordningen, ex. genom att använda en slump generator, tabell, eller det klassiska med "lottdragning ur hatt" .

Kör ordningen man får fram kan se ut enligt följande:

Först körs försöks nr: 5, därefter nummer 6, sedan nummer 7, 4, 1, 3, 8 och slutligen försök nr. 2.

Den första körningen skulle alltså motsvaras av ett lågt värde på faktorerna A och B. Nivåerna på samspelet behöver inte bestämmas, utan ges informellt av tecknet för produkterna mellan faktorerna. Det skulle för försök 5 medföra låga värden på samspelet AC, AD, BC BD

och ACD, medan faktorerna C, D, AB, CD, ABC, samt trefaktor samspelet ABD körs med ett högt värde.

Exempelvis har A ett negativt tecken medan C är positivt. Av detta följer att produkten AC är negativ, och räknas då som låg nivå.

Resultatet efter den första körningen skrivs sedan in på raden för försök nr 5, i kolumnen för uppmätt värde på Y i Excel arket Faktor4\_1, med fliken Kodad försöksplan 4\_1. På samma sätt utförs de övriga försöken, och resultaten skrivs in i kolumnen för uppmätt värde (Y). Eftersom försöksplanerna är upprättade för att studera tre responser, här benämnda X,Y och Z, kan man också studera de två övriga vid samma tillfälle. Förfarandet är lika som vid studien av responserna Y och körs lämpligen parallellt.

När man slutligen har kört alla åtta försöken, övergår man till att grafiskt avgöra vilken eller vilka faktorer som är intressanta. Detta görs genom att studera normal plottarna för respektive respons X,Y,Z. I en halv normal plot enl. diagram 1 har effekterna endast positiva absolutvärden, där är de punkter som inte ligger på en linje från origo och genom punkterna för ca 50 % kumulativ frekvens, som kan misstänkas vara av intresse och då kan räknas som aktiva.

De faktorer som identifieras som aktiva fylls i med en 1:a i respektive kolumn i fliken Norm.plot.eff\_Y.

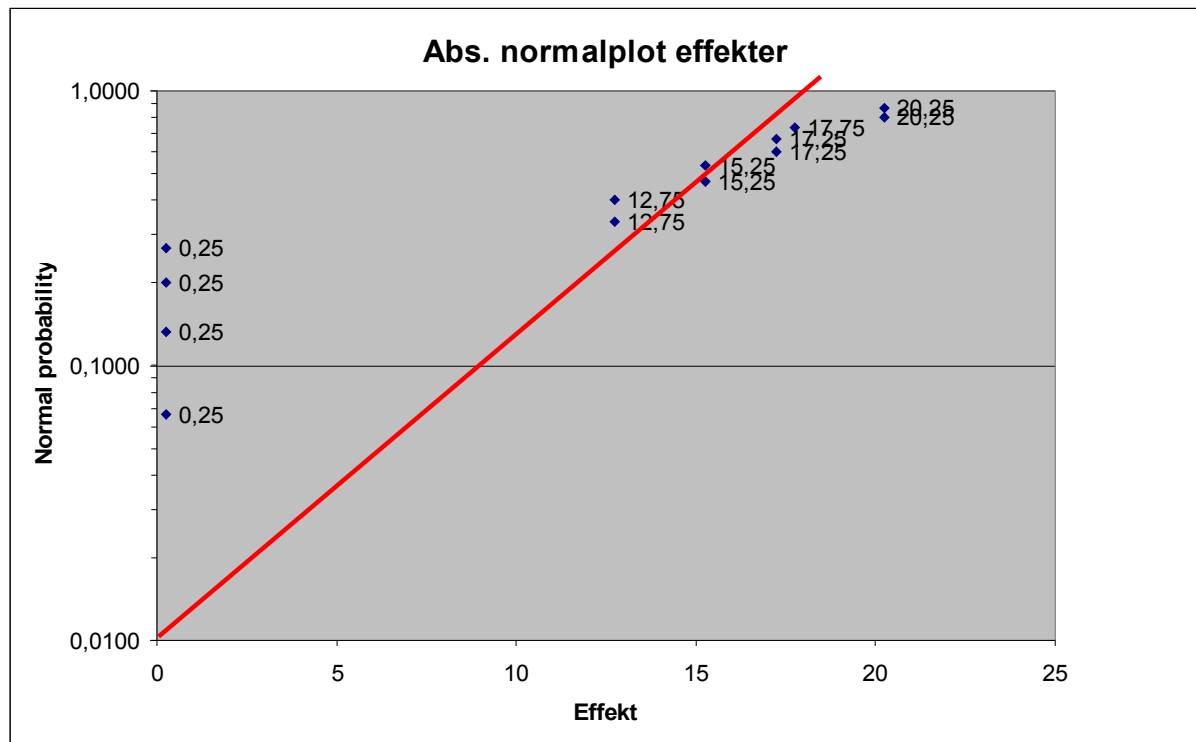


Diagram 1. Absolut eller halv normalplot, med linje från origo genom värden för 50% kumulativ frekvens. Värden ur Douglas.C.Montgomery(2003) *Design and analysis of experiments*.

Vid studie av en hel normal plot enligt diagram 2, så tillhör punkterna på en tänkt linje kring 50 % kumulativ frekvens troligen normal fördelningen, och räknas därför inte som aktiva. Ytterligare säkerhet i bedömningen fås om man genom projektion kan bilda replikat, och då kan dra slutsatser om effekterna genom statistiska mått. Dessa statistiska mått finns presenterade under flikarna för varians analys i Excel arket, och visas nedan i tabell 2.

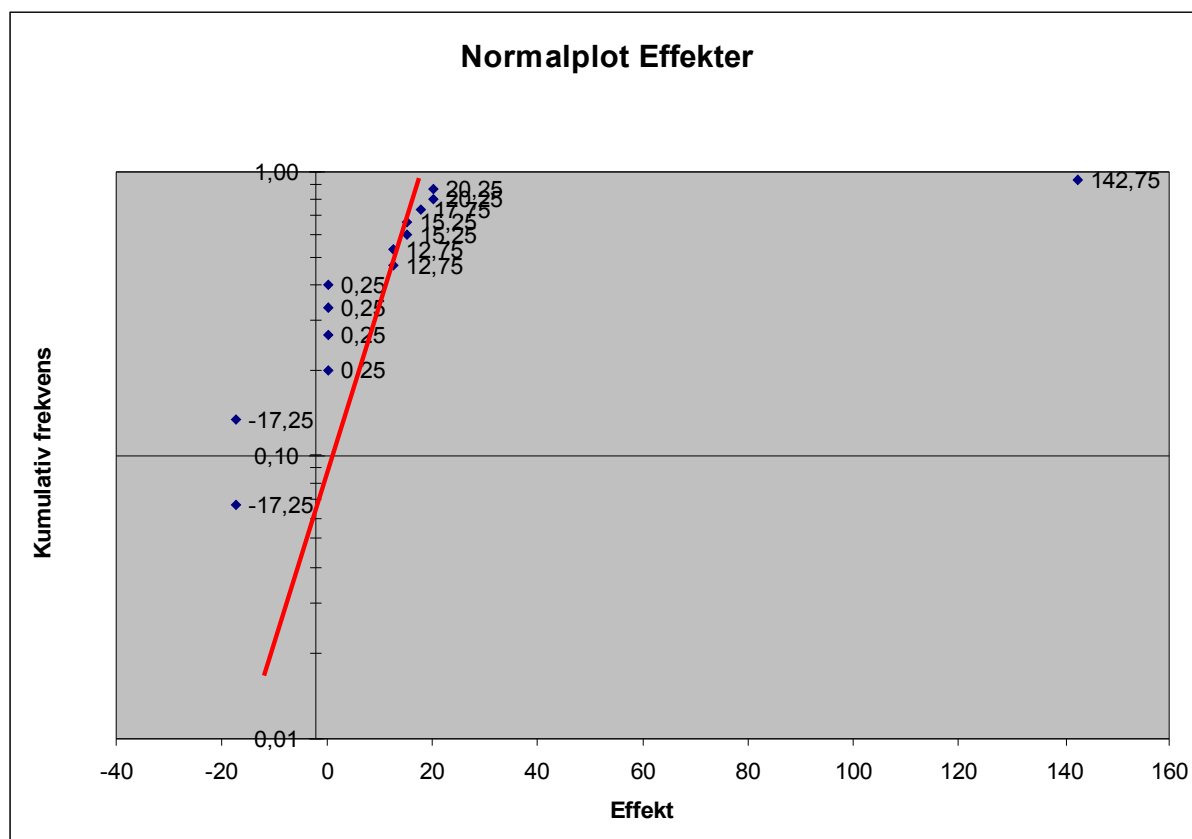


Diagram 2. Hel normalplot, med tänkt linje genom punkterna kring 50% kumulativ frekvens. Värden ur Douglas.C.Montgomery(2003) *Design and analysis of experiments*.

Tabell 2. Statistiska mått, del av tabell i Excelark för varians analys.

Varians analys							
	Anmärkn.		SSa	SSb	SSc	SSd	SSab
Kvadrat summor	Alla SSx		2450	480,5	578	2592	288
SSx Modell	Enl.norm.plot.		0	480,5	0	0	288
Frihetsgrader			1	1	1	1	1
			MSa	MSb	MSc	MSd	MSab
Medelkvadrat summa			0	480,5	0	0	288
			Foa	Fob	Foc	Fod	Foab
Jämf. F-värde			0	0,834563613	0	0	0,50021711
F-test			0,0000	0,4126	0,0000	0,0000	0,5184

Slutligen gör man en översyn av de förhållanden som rådde vid experimenten, Antagandet om normalfördelning kontrolleras genom att studera normal plotarna för residualerna i diagram 3. Dessa residualer skall inte uppvisa något särskilt mönster, och bör ansluta till en linje genom de närmaste punkterna för 50 % kumulativ frekvens. Man bör också kontrollera plottarna för residualerna mot predikterade värden. Här bör man inte heller se något mönster eller någon trend. Om man får problem med normalploten, och/eller residualerna, brukar man genomföra en transformation. En vanlig transformation är att man logaritmerar värdena. Ofta leder en sådan transformation till ett tydligare avsteg från normal linjen, och på så sätt blir det lättare att avgöra vilka punkter som är intressanta i normalplottarna för effekterna.

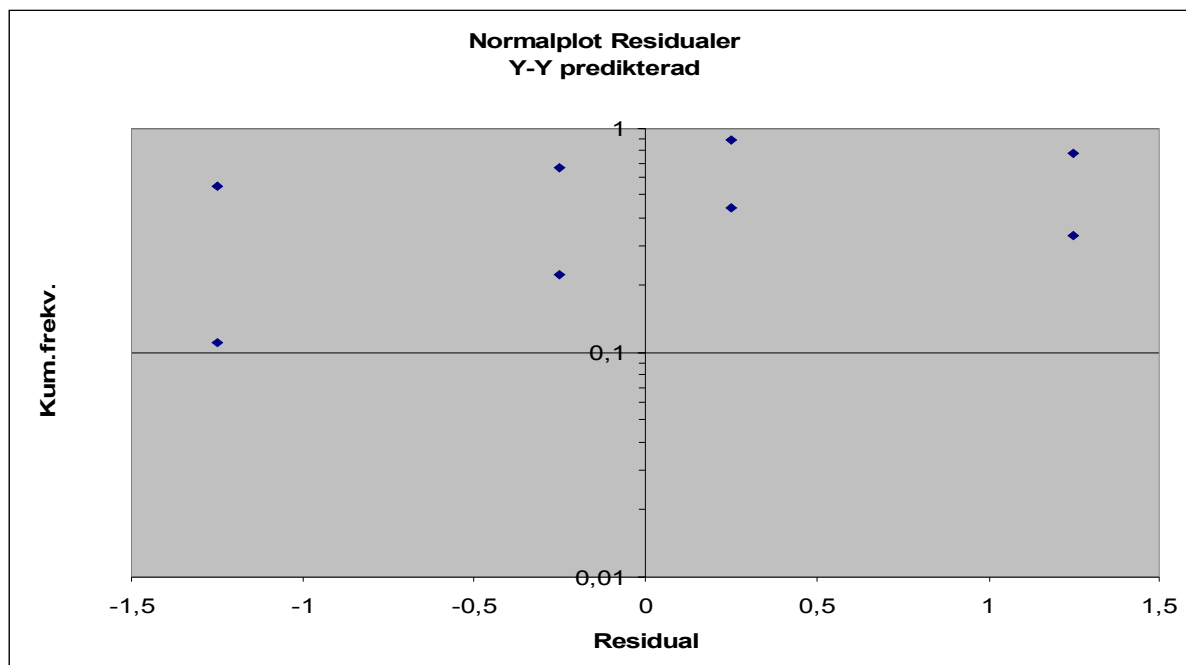


Diagram 3. Normalplot residualer.



När kontrollen av normalplotten och residualer mot predikterade värden är gjord, har man fått fram modellerna för de studerade responserna X, Y och Z (se tabell 3). Dessa återfinns i fliken för modeller i EXCEL arket.

Tabell 3. Linjära modeller för de studerade responserna ur EXCEL.

<b>Modeller för de studerade objekten X , Y , Z</b>														
<b>Lager</b>			I	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC
Tryck (Mpa)	X	71,4	8,88	0	6,38	7,63	0	-8,6	10,1	0	0	0	0	0
<b>Mald prod.</b>			I	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC
Spec. yta (mm <sup>2</sup> /kg)	Y	70,8	9,5	0	7	8,25	0	-9,3	9,5	0	0	0	0	0
<b>Kvarn</b>			I	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC
Effekt (kW)	Z	17,5	7,75	0	9	3	0	3,25	2,25	0	0	0	0	0

I diagram 4 och fliken för samspel i EXCEL arket, kan man se plottar över eventuella tvåfaktor samspel i modellerna. De gånger samspel förekommer har de vanligen en större effekt än de enskilda faktorerna har var för sig. Med ledning av dessa uppgifter kan man dra slutsatser om processens förväntade resultat med ingående värden för de olika faktorerna. Denna slutsats gäller inom det givna intervallet, dvs inom intervallet som begränsas av respektive faktors höga eller låga värde.

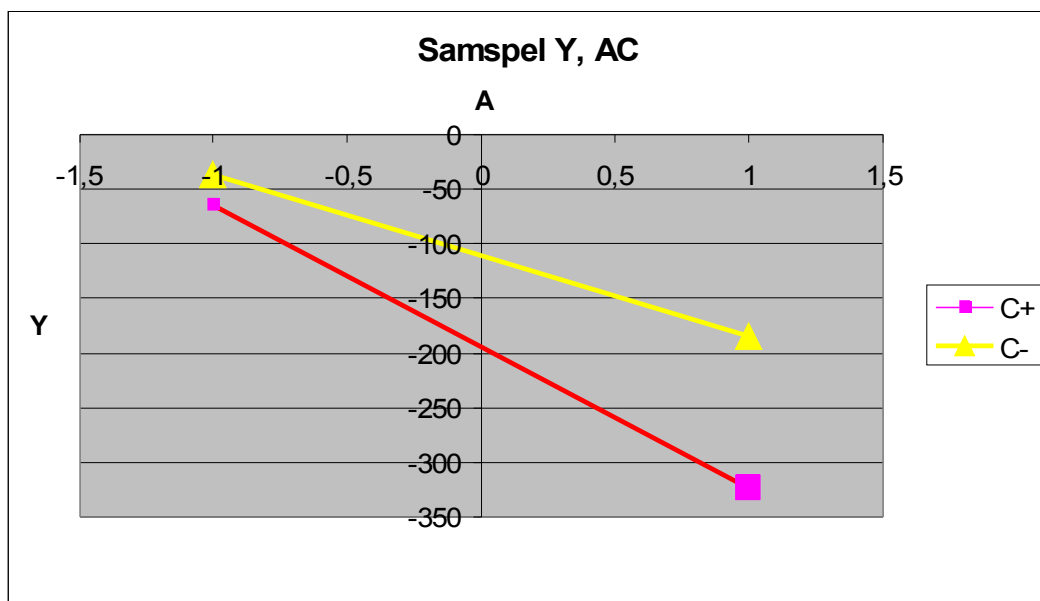


Diagram 4. Samspelseffekter mellan faktorerna A och C.

#### FORMLER FÖR EFFEKTERNA:

En allmän formel för att beräkna effekterna av de olika faktorerna återfinns i Lennart Råde, Bertil Westergren (2001) *Mathematics handbook for science and engineering*, exempelvis beräknas effekten av en enskild faktor enligt:

$$A = (-Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8) / 4 \quad \text{Ekv. 3.1}$$

Teckenföljden för den uppmätta responsen  $Y$  vid de olika experimenten överens stämmer med tecknen i tabell 1. *Försöksplan med 4 ingående faktorer.*

Samspelet mellan A och B kan enligt tabell 1 beräknas som:

$$A \times B = (+Y_1 - Y_2 - Y_3 + Y_4 + Y_5 - Y_6 - Y_7 + Y_8) / 4 \quad \text{Ekv.3.2}$$

Tabell 1 ger teckenföljden för de övriga huvud faktorerna och samspelet som beräknas enligt ovan.

#### STATISTISK ANALYS AV MODELLEN

Nedan ges ett exempel med två faktorer och en respons, men modellen kan byggas ut med de antal faktorer och responser man önskar studera. Ur Douglas.C.Montgomery(2003) *Design and analysis of experiments.*

Observationerna från ett flerfaktor försök med  $n$  faktorer kan allmänt beskrivas med en regressions modell:

$$Y = \beta_0 + \beta_1\alpha_1 + \beta_2\alpha_2 + \dots + \beta_n\alpha_n + \epsilon_{ijk} \quad \text{Ekv.3.3}$$

Där  $Y$  är responsen,  $\beta_i$  är de sökta parametrarnas värde,  $\epsilon_{ijk}$  är fel termerna och  $\alpha_i$  är variablerna som skall representera faktorerna A,B,C ... AB osv.

I fallet med försök som har n stycken replikat inför vi följande beteckningar för att beräkna kvadratsummor i den statistiska analysen.

Summan av alla responser ( $y$ ), över kolumner och replikat på  $i$ :te raden

$$y_{i..} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}$$

Ekvation 4.1

Summan av alla  $y$  över rad och replikat på  $j$ :te kolumnen.

$$y_{.j.} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ijk}$$

Ekvation 4.2

Summan av alla  $y$  i en cell över alla replikat.

$$y_{ij.} = \sum_{k=1}^n y_{ijk}$$

Ekvation 4.3

Summan av alla  $y$  över rad, kolumn och replikat

$$y_{...} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}$$

Ekvation 4.4

Kvadrat summan för huvud effekterna i ett exempel med två faktorer, A och B är:

$$SS_a = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a y_{i..}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

Ekv. 4.5

$$SS_b = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b y_{.j.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

Ekv.4.6

Sum of Squares,  $SS_{ab}$  för samspelet mellan faktor A och B brukar beräknas i två steg:

$$SS_{ab} = SS_{Subtotals} - SS_a - SS_b$$

Ekv.4.7

Där formeln för  $SS_{Subtotals}$  är enligt nedan:

$$SS_{Subtotals} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij.}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

Ekv.4.8

Den totala kvadratsumman  $SS_T$ :

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$$

Ekv.4.9

Slutligen beräknas kvadratsumman för bruset eller felet. Denna kvadratsumma betecknas av Montgomery som Sum of Squares due to Error.

$$SS_E = SS_T - SS_{Subtotals}$$

ekv.4.10

## VARIANS ANALYS

I händelse av att man vid experimenten kan få ett försök med flera replikat genom projektion, och följande antaganden kan anses uppfyllda:

- Ekvation 3.5 för modellen gäller
- Fel termerna  $\epsilon_{ijk}$  är oberoende och normalfördelade variabler
- Feltermerna har konstant varians.

Då gäller att:

Kvoterna mellan Medel kvadraterna kan anses tillhöra F fördelningen, och den kritiska regionen är den övre svansen i  $F(x)=0,95$ .

Test proceduren visas i varians analys tabell 4 nedan.

Tabell 4. Variansanalys vid försök med två faktorer.

Variabel	Kvadrat summa	Frihetsgrader	Medel kvadrat summa	F <sub>0</sub>
A	SS <sub>a</sub>	a-1	$MS_a = \frac{SS_a}{(a-1)}$	$F_0 = \frac{MS_a}{MS_e}$
B	SS <sub>b</sub>	b-1	$MS_b = \frac{SS_b}{(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_b}{MS_e}$
AB	SS <sub>ab</sub>	(a-1)(b-1)	$MS_{ab} = \frac{SS_{ab}}{(a-1)(b-1)}$	$F_0 = \frac{MS_{ab}}{MS_e}$
Error	SS <sub>e</sub>	ab(n-1)	$MS_e = \frac{SS_e}{ab(n-1)}$	
Total	SS <sub>T</sub>	abn-1		

---

## RESULTAT

---

### PEBBLES SIKT

En litteraturstudie om nötning och dess teorier resulterade i följande förslag på förändringar i den befintliga siktkonstruktionen.

- Ett förslag på ny konstruktion till de båda Pebblesiktarna vid LKAB:s Anrikningsverk KA2, är upprättad i elektroniskt format (Autocad).
- Den föreslagna konstruktionen innebär att gallerpinnarna kan rotera kring sin egen axel.
- Ett hårdare material 34CrNiMo6 föreslås i gallerpinnarna.
- Gallerstängerna har en infästning som är dämpad med gummi matta.
- Upphängningen av sikten har förändrats, i förslaget är sikten endast upphängd i två kedjor istället för fyra i befintlig sikt.
- Gallerpinnarna är löstagbara.

### MALNINGS PROCESSEN -FAKTOR FÖRSÖK

- I syfte att utreda de ingående faktorernas inverkan vid malnings processen är försöksplaner för fyra faktorer upprättade i EXCEL.
- Resultaten av försöksplanerna är testade mot exempel i Douglas.C.Montgomery(2003) *Design and analysis of experiments*.

---

## DISKUSSION

---

### PEBBLES SIKTAR

På grund av den stora variationsbredden hos de ingående variablerna i processen, bör man utreda de olika parametrarna i siktkonstruktionen genom prövning.

Den föreslagna konstruktionen på Pebbles sikten medger flera inställningsmöjligheter för anslagsvinkeln då godset träffar siktgallret. Eftersom det förekommer variationer i storlek och mängd hos pålastat gods, bör den ideala vinkeln utredas genom prövning vid drift. Vinkeln relativt horisontalplanet ökar om öronen för kedje infästningen placeras längre bak på sikten. Det medför i sin tur att anslagsvinkeln minskar, vilket är gynnsamt ur nötnings synpunkt för det relativt spröda materialet i gallerpinnarna.

Syftet med att hänga upp sikten i två kedjor i stället för fyra, är att man skall få en dämpning vid stöt ögonblicket då godset träffar sikten. Dämpningen består i att hela siktramen tillåts vicka likt en gungbräda runt axeln, i vilken den är upphängd. Det är dock svårt att på förhand bestämma i vilket läge upphängnings öronen skall skruvas fast, därför bör utprovningen av inställningen ske under verkliga drifts förhållanden.

Ytterligare prövning bör göras när det gäller materialvalet, det är önskvärt att det nötta materialet har större hårdhet än abrasivet. Enligt R.G. Bayer gör man dock ingen större vinst med att ha ett material som är mer än ca: 30 % hårdare än det nötande godset.

### FAKTORFÖRSÖK

Vid experimentens början är det av intresse att sortera ut faktorer som inte påverkar processens utfall. Ur ett ekonomiskt perspektiv, är det lämpligt att inledningsvis starta med reducerade försök. Detta reducerade försök kan ofta projiceras till ett fullt försök, genom att man ur experimenten kan gallra ut faktorer som tidigare varit tveksamma ur effekt synpunkt. När man har gallrat ut en eller flera faktorer återgår man till den ursprungliga försöksplanen, med bibehållna värden från det genomförda reducerade försöket. I planen som blir kvar när inaktiva faktorer tagits bort, kan man ur tecken följderna och nivåerna på de kvarvarande faktorerna se att man har fått flera replikat.

I händelse av att man får flera replikat är det möjligt att genomföra en statistisk utvärdering, eftersom replikaten i sig ger upphov till den variation som är nödvändig för att genomföra en varians analys.

De försöksplaner som redovisas i denna rapport, ger en process modell med linjära samband. Om samspelsfaktorer är aktiva medför dock dessa en vridning av funktions ytan för processens resultat. I fall dessa samband inte beskriver processen tillräckligt noggrant, kan man bygga ut försöken med att använda sk centrum punkter. Namnet på dessa punkter antyder att man kör ytterligare försök, med värden som ligger mellan högt och lågt värde för faktorerna. Anledningen till att man lägger till en extra punkt, beror på att det krävs minst tre punkter för att upptäcka kvadratiske samband.



---

## SLUTSATS

---

### PEBBLESSIKT

I den nya konstruktionen föreslås att galler pinnarna är lösa och kan rotera kring sin egen axel, det bör medföra att nötningen på dessa minskar. Anledningen är att en situation med rullkontakt är att föredra framför glidkontakt.

Ett seghärdat material föreslås i gallerpinnarna, det är önskvärt att det nöta materialet är hårdare än abrasivet, för att erhålla ett större motstånd mot nötning än tidigare material.

Infästningen för gallerpinnarna i sikten är dämpade med en gummi matta, det bör minska anslagsenergin när godset träffar pinnarna, vilket bör medföra att gallerstängerna nöts mindre.

Upphängningen av hela siktramen är förändrad, den föreslagna sikt konstruktionen innebär att den hänger i två kedjor från att tidigare varit upphängd i fyra. I och med detta finns möjlighet att justera anslagsvinkeln vid stöten som uppträder när godset faller ned på sikten. Förslaget innebär också att systemet fungerar som en vippbräda, detta bör leda till en minskad anslagsenergi och mindre nötningsbenägenhet.

### MALNINGS PROCESSEN -FAKTOR FÖRSÖK

Ur försöksplanerna fås en linjär modell för förväntat utfall i den studerade processen, därigenom kan man optimera den med avseende på den respons man utvärderar. Ett exempel kan vara när man blandar olika material eller komponenter i någon process, där ett annat blandningsförhållande kan ge ett bättre resultat. Det kan även vara så att man uppnår lika bra kvalitet i processen, med den skillnaden att man når bättre ekonomi genom att öka inblandningen av ett billigare material.

Så här i efterhand kan jag slutligen konstatera att det är väldigt besvärligt att genomföra studier av flerfaktorförsök i EXCEL. Det hade varit bättre att använda något statistikprogram som är anpassat för detta. Även om man inte är bekant med program varan så är arbete och inlärnings tid för detta mindre än arbetet med att bygga upp samma sak i EXCEL.

Ett anpassat program för försöksplanering är också mer användarvänligt, eftersom det oftast finns inbyggda hjälp funktioner i programvaran och den statistiska analysen görs automatiskt. De försöksplaner som finns redovisade i denna rapport kräver att man är väl insatt i hur försöksplaner fungerar och byggs upp. På grund av ovanstående rekommenderas att man exempelvis använder STATGRAPHICS i stället för EXCEL.

---

## REFERENSER

---

Raymond. G. Bayer. (2004a) *Mechanical wear fundamentals and testing*. 2:nd edition. New York. M. Dekker . ISBN: 0-8247-4620-1

Raymond. G. Bayer. (2004b) *Engineering design for wear*. 2:nd edition. New York. M. Dekker . ISBN: 0-8247-4772-0

Raymond. G. Bayer. (1994) *Mechanical wear prediction and prevention*. 2:nd edition. New York. M. Dekker . ISBN: 0-8247-9027-8

Douglas.C.Montgomery(2003) *Design and analysis of experiments*. 5: th edition New York. Wiley & sons. ISBN 0-471-31649-0

Lennart Råde, Bertil Westergren (2001) *Mathematics handbook for science and engineering*. Lund. Studentlitteratur. ISBN 91-44-00839-2

Internet.

<http://www.gordonengland.co.uk/wear.html>

