

# En tekno-ekonomisk analys av separat malning av lövvedsmassa i produktionen av vitt kalandrerat papper

Ville Vornanen



*Diplomarbete i kemi- och processteknik*

*utförd under handledning av professor Anders Brink.*

Laboratoriet för process- och systemteknik

Fakulteten för naturvetenskaper och teknik  
Åbo Akademi

Februari 2023

## FÖRORD

Jag vill tacka personalen vid BillerudKorsnäs i Jakobstad för hjälp och stöd under detta diplomarbete. Jan Gustafsson stödde mitt lärande under arbetet. Matti Myllylä och Marjo Santanen har givit mig inspiration och agerat som mentor.

## FÖRKORTNINGAR OCH BETECKNINGAR

|      |   |
|------|---|
| BHKP | <i>Bleached Hardwood Kraft Pulp</i> , blekt kemisk massa av lövträd   |
| BKSP | <i>Bleached Kraft Softwood Pulp</i> , blekt kemisk massa av barrträd  |
| HC   | <i>High Consistency</i> , pappersmassa under hög konsistens (25–35 %) |
| LC   | <i>Low Consistency</i> , pappersmassa under låg konsistens (2–6 %)    |
| PIX  | Ett prisindex för kemisk massa, papper och kartong                    |
| SEL  | <i>Specific Edge Load</i> , specifik kantbelastning-malningsteori     |
| SRE  | <i>Specific Refiner Energy</i> , specifik energiförbrukning           |

# 1 SAMMANFATTNING

I den här studien undersöks hur man kan optimera råmaterials- och malningskostnader vid tillverkning av vitt kalandrerat papper genom en ändring i malningslinjen. Processändringen möjliggör separat malning av lövvedsmassa och barrvedsmassa, vilket ger bättre möjligheter att utveckla lövvedsmassans egenskaper. Bättre egenskaper hos lövvedsmassa möjliggör en ökning av lövvedshalten i produkterna. I arbetet undersöks även hur energibehovet påverkas av förändringen. Undersökningen utförs genom teoretiska beräkningar av malningsprocessen och energibehovet. De teoretiska beräkningarna kompletteras med brukspersonalens erfarenheter.

Studien visar att återbetalningstiden på processändringarna är 3,4 år. Återbetalningstiden är längre än de riktlinjer som används för att utvärdera lönsamheten av denna typ av investeringar. Besparingarna uppkommer huvudsakligen genom prisskillnaden mellan lövvedsmassa och barrvedsmassa och storleken på inbesparingarna är proportionell mot prisskillnaden mellan massorna. En känslighetsanalys visar att variationer i elpriset inte nämnvärt påverkar återbetalningstiden.

Nyckelord: lövvedsmassa, barrvedsmassa, högkonsistensmalning, lågkonsistensmalning, provkörningsplan, återbetalningstid.

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

|  |     |
|--|-----|
| FÖRORD.....  | I   |
| FÖRKORTNINGAR OCH BETECKNINGAR.....                                | II  |
| 1 SAMMANFATTNING .....   | III |
| INNEHÅLLSFÖRTECKNING .....   | IV  |
| 2 INLEDNING .....  | 1   |
| 2.1 Råmaterialsammansättningens roll i papperstillverkningen ..... | 3   |
| 2.2 Målsättningar för arbetet .....                                | 5   |
| 3 Pappersmassans egenskaper .....                                  | 6   |
| 3.1 Barrvedsmassa och lövvedsmassa .....                           | 9   |
| 4 Malning av fibrer .....  | 11  |
| 4.1 Malningens effekt på fibrer.....                               | 11  |
| 4.2 Malningens effekt på pappersegenskaper.....                    | 13  |
| 4.3 Malningsteori .....  | 15  |
| 4.3.1 Specifik kantbelastning .....                                | 16  |
| 4.3.2 Specifik energiförbrukning.....                              | 18  |
| 4.3.3 Flockmalningsteorin .....                                    | 19  |
| 4.4 Malningsparametrar .....                                       | 21  |
| 4.4.1 Konsistens .....   | 21  |
| 4.4.2 Malningsintensitet .....                                     | 22  |
| 4.4.3 pH.....  | 23  |
| 5 Processbeskrivning.....  | 23  |
| 5.1 Malning av massa i nuläget.....                                | 23  |
| 5.2 Föreslagen malningsprocess för lövvedsmassa .....              | 27  |
| 5.3 Hantering av utskott .....                                     | 30  |

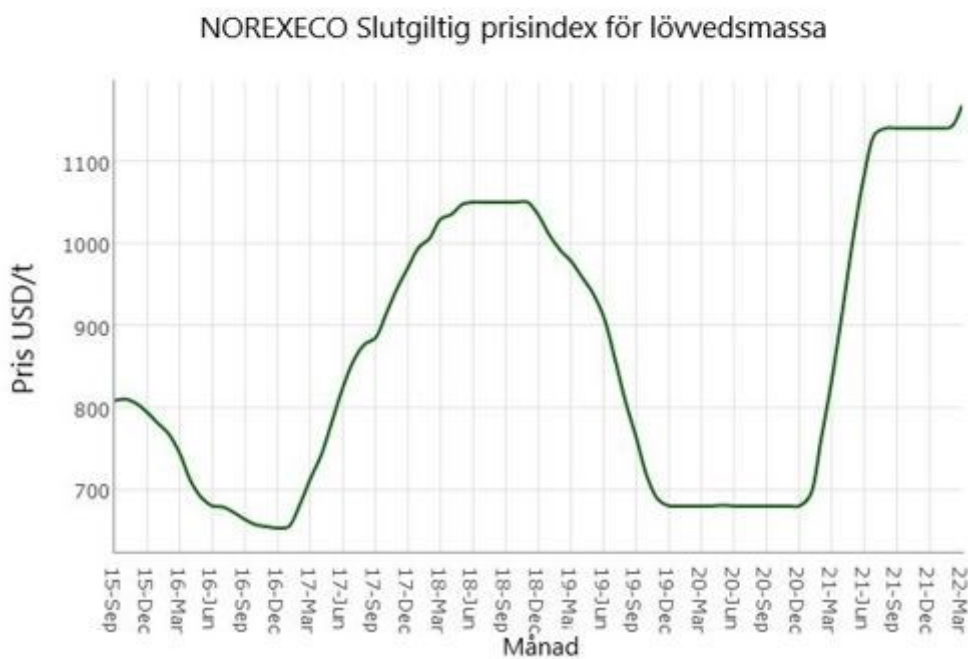
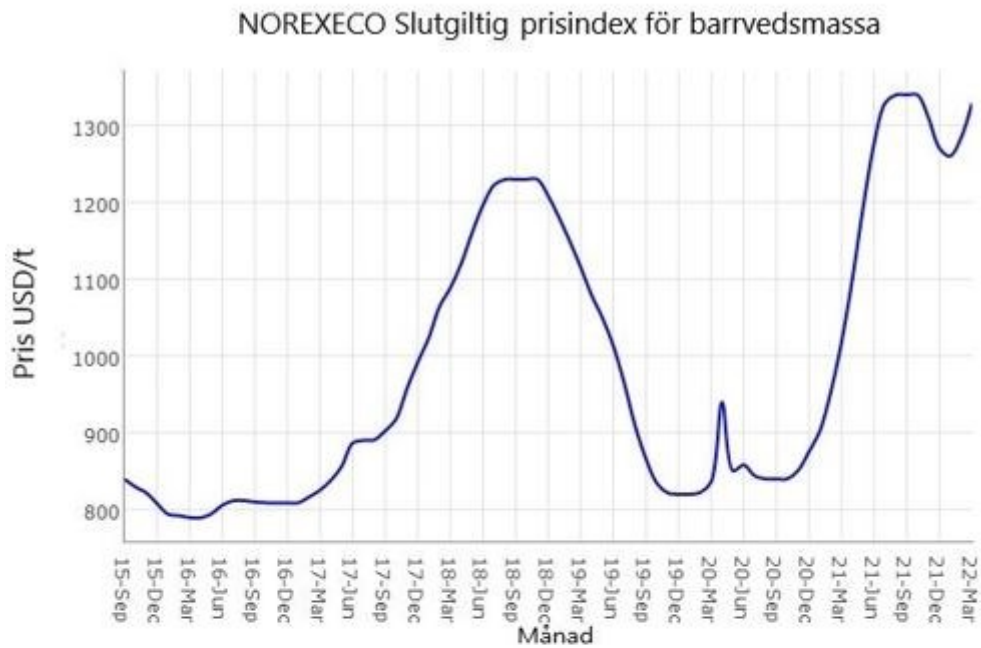
|     |   |    |
|-----|---|----|
| 6   | Tekno-ekonomisk analys av återbetalningstiden .....           | 32 |
| 6.1 | Begränsningarna i processen .....                             | 33 |
| 6.2 | Metoder .....   | 34 |
| 6.3 | Parametrar .....  | 36 |
| 6.4 | Data .....  | 38 |
| 6.5 | Kostnadsfaktorer.....   | 40 |
| 7   | Resultat och diskussion.....                                  | 41 |
| 7.1 | Återbetalningstiden för separat malning av lövvedsmassa ..... | 41 |
| 7.2 | Besparingspotentialen hos tunna papperslag .....              | 44 |
| 7.3 | Osäkerhetsfaktorer .....                                      | 46 |
| 8   | REFERENSER.....   | 49 |
| 9   | Bilaga 1 .....  | 52 |





## 2 INLEDNING

Stigande råvarupris och hårdare konkurrens tvingar företagen att sänka sina produktionskostnader. Besparingarna kan inte göras på bekostnad av kvalitén, vilket sätter begränsningar på de tillgängliga alternativen. Pappersmassa är det viktigaste råmaterialet i papperstillverkningen. Priset på pappersmassa varierar cykliskt och för tillfället håller priserna på att öka både då det gäller barrvedsmassa och lövvedsmassa. Figur 1 visar prisutvecklingen av barrvedsmassan och lövvedsmassan under de senaste sju åren.



Figur 1. Prisutvecklingen av barrvedsmassa och lövvedsmassa i enheten US dollar per ton. Prisindexet är beräknat som det aritmetiska medeltalet av de veckoliga PIX-indexen inom den respektive månaden (NOREXECO, 2022).

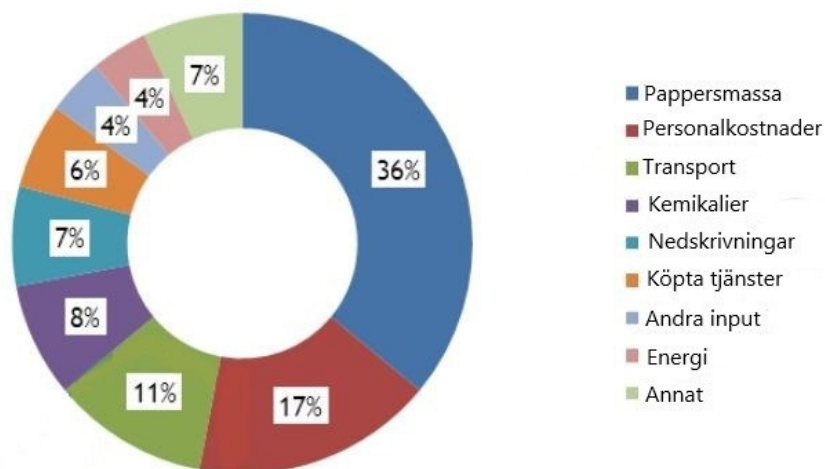
Barrvedsmassan har traditionellt varit dyrare än lövvedsmassan. Analys av figur 1 visar att prisskillnaden mellan de två råmaterialen varierar mellan 10–200 \$ per ton. Ett alternativ för att minska råmaterialkostnader är att ersätta en del av barrvedsmassan med den förmånligare

lövvedsmassan. Pappersindustrin använder stora volymer av råmaterial årligen vilket gör att även en liten minskning i råmaterialkostnader per ton har en stor inverkan.

## 2.1 Råmaterialsammansättningsens roll i papperstillverkningen

Pappersindustrins kostnadsstruktur visas i figur 2. Figuren beskriver kostnadsstrukturen i Sverige, men den kan i detta sammanhang anses beskriva på ett tillfredsställande sätt även den finska pappersindustrin. Figur 2 är från 2014 och till exempel energipriset har ökat sedan dess vilket har en inverkan på energins andel i kostnadsstrukturen. Pappersmassans andel är 36 % av totalkostnaderna. Eftersom andelen är så hög har optimeringen av råmaterialanvändningen stor inverkan på hela företagets ekonomi.

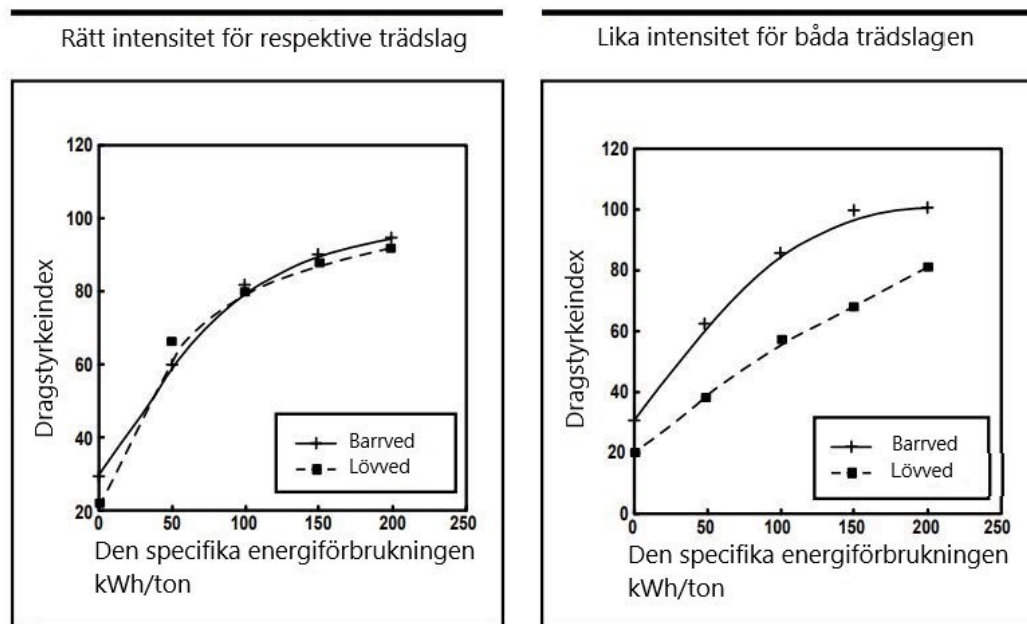
Kostnadsstrukturen för en svensk pappersfabrik med leveranser till centrala Europa



Figur 2. Kostnadsstrukturen för en svensk pappersfabrik med leveranser till centrala Europa i 2014. (Erken, 2014)

Malning är en kritisk enhetsprocess i förberedning av pappersmassan. Papprets styrkeegenskaper utvecklas under malningen. Eftersom lövveds- och barrvedsmassornas optimala malningsförhållanden är olika måste malningsstrategin uppdateras då en större andel lövvedsmassa önskas användas. Den blandade malningen ger inte optimala malningsresultat för vare sig barrvedsmassa eller lövvedsmassa. Separat malning av massor

möjliggör användning av rätt malningsintensitet för både lövvedsmassa och barrvedsmassa (Baker, 1995). Dragstyrkan hör till de viktigaste egenskaperna hos papper. Dragstyrkans utveckling både då massor mals med rätt intensitet och icke-optimal intensitet illustreras i figur 3. Malning med rätt intensitet utvecklar dragstyrkan hos lövvedsmassan högre än malning där malningsintensiteten är lika för båda trädslagen.



Figur 3. Dragstyrkeindexen som en funktion av specifika energiförbrukningen både med trädslagsspecifika och lika stora malningsintensiteter (Baker, 1995).

Den separata malningen tillåter massan att nå sin potential till fullo. Fördelarna med separat malning begränsas inte endast till optimal utveckling av fiberegenskaper utan även besparingar i elektricitetsförbrukning kan förväntas. Tabell 1 visar förändringen i elektricitetsförbrukningen då massan maldes separat i stället för blandad malning. Förändringen ökade genomströmningen och minskade malningsenergin med cirka 25 % (Baker, 1995).

Tabell 1. Energiförbrukningen och genomströmningen i malning av massor under både blandad och separat malning (Baker, 1995).

| Produkt                   | Medelvärdet på genomströmningen [ton/h] | Specifik energiförbrukning [kWh/ton] |
|---------------------------|---|--------------------------------------|
| Massa A (Blandad malning) | 7,8                                     | 175                                  |
| Massa A (Separat malning) | 8,5                                     | 132                                  |
| Massa B (Blandad malning) | 7,7                                     | 179                                  |
| Massa B (Separat malning) | 8,2                                     | 131                                  |

## 2.2 Målsättningar för arbetet

Följande frågor utgör basen för detta arbete:

- Hur mals lövvedsmassan på ett kostnadseffektivt sätt?
- Hur ska malningsgarnityren vara utformad vid separat malning av lövvedsmassa
- Hur förändras de operativa kostnaderna då råmaterialsammansättningen och malningskostnaderna ändras?

Målet med arbetet är att estimeras besparingspotentialen hos en processändring i malning. Malningen av lövvedsmassa, som hittills gjorts tillsammans med barrvedsmassan, kommer att utföras separat med en för detta ändamål avsedd malkvarn. Arbetet ger en processbeskrivning både av den nuvarande malningsprocessen och den planerade processen för separat malning av lövvedsmassan. Processbeskrivningen stöder operatörerna i användningen av den nya apparaturen och kan användas som undervisningsmaterial.

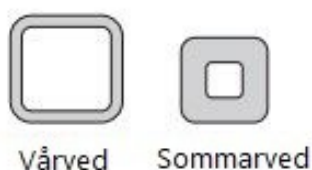
Provkörningar för ett senare skede presenteras i bilaga 1. Papperskvaliteter har specificerade egenskaper enligt kundernas krav vilket gör att en noggrann planering behövs före ändringar i papprets råmaterialsammansättning kan göras. En teoribaserad skattning av projektets återbetalningstid presenteras i kapitel 6.

Arbetet är fokuserat främst på teknisk analys av optimering av produktion av papper vid pappersbruket. Torkningen av pappersbanan i torkpartiet och efterföljande delprocesser lämnas utanför arbetet. Genomgång av dessa ämnen ger inte mervärde till arbetets beställare. Samtidigt är de oväsentliga för arbetet i sig med tanke på arbetets målsättningar.

### 3 Pappersmassans egenskaper

Fiberlängden är en mycket viktig egenskap hos pappersmassa. Massans styrkeegenskaper beror till en viss grad på fiberlängden. Dock orsakar allt för långa fibrer en försämrad styrka hos pappret. Den försämrade styrkan beror på att långa fibrer har en tendens att trassla in sig i varandra och därmed blir fiberfördelningen ojämn. Fiberlängden är av större vikt hos massor med låg bindningsstyrka såsom massor med låg malningsgrad. Längden på fibrerna varierar mellan en och sex millimeter. Hos lövvedsmassorna är fiberlängden kortare än hos barrvedsmassor (Ek et.al., 2009).

Vårveden är den delen av veden som växer under det tidiga skedet av växtsäsongen. Vårvedens andel av den årliga tillväxten är mellan 40 och 80 %. Då tillväxten minskar och stannar under hösten är de nya cellerna mindre, tjockare och har en högre mekanisk styrka (Domec, 2002). I figur 4 illustreras skillnaden i cellväggs tjocklek mellan vårveden och sommarveden.

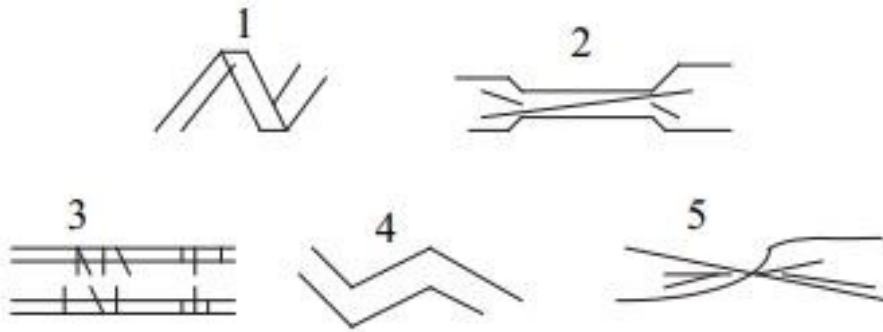


Figur 4. Cellväggs tjocklek hos vårved och sommarved (Ek et.al., 2009).

Cellväggen hos vårved är tunnare och fiberdiametern är större än hos sommarved. Vårvedsfibrerna kollapsar under belastning och är mera flexibla än andra fibrer. Fibergrovlek definieras som fiberviktens förhållande till fiberlängden. Ju tjockare cellvägg, desto högre fibergrovlek (Ek et.al., 2009).

Fibrerna i veden är raka och rörformiga. I kemiska massor kan fibrerna vara tvinnade, böjda eller hoptryckta. Olika formförändringar illustreras i figur 5. Formförändringarnas inverkan på pappersegenskaper varierar beroende på typen av formförändringen. Det har visats att egenskaper hos vissa papperslag faktiskt förbättras då fibrer är hoptryckta och har veck. De förbättrade egenskaperna förklaras med den ökade tøjbarheten av pappret som hoptryckta och veckiga fibrer orsakar. Fiber med veck och böjda fibrer har en försämrad förmåga att

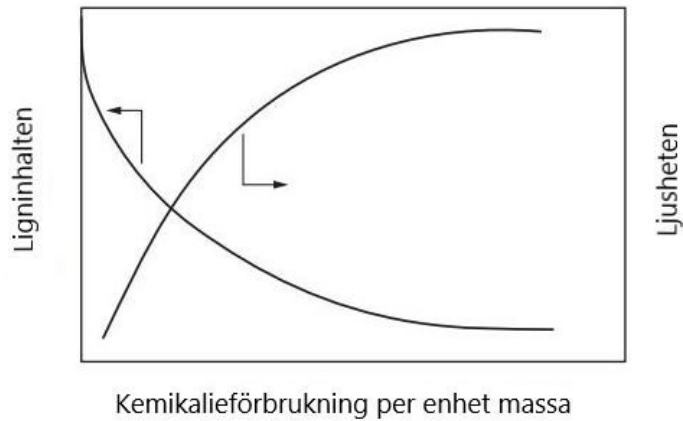
överföra belastning vilket orsakar en försämrad dragningsstyrka. Kapning av fibrer kan också räknas med som en formförändring. Kortare fibrer ger massan sämre styrka (Ek et.al., 2009).



*Figur 5. Formförändringar hos fibrer. 1. Veck. 2. Hoptryckt fiber. 3. Dislokation. 4. Böjd fiber. 5. Tvinnad fiber (Ek et.al., 2009).*

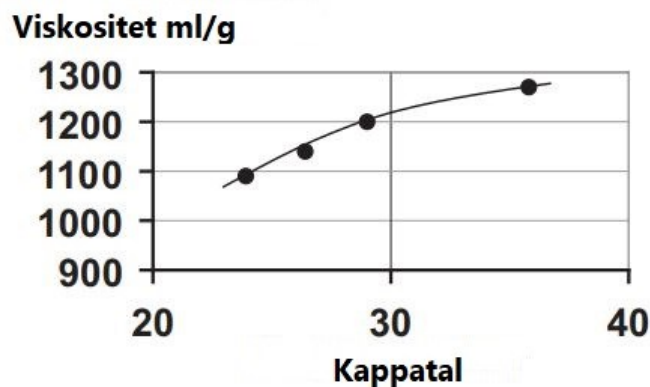
Formfaktorn används för att kvantifiera förändringar i fibrernas form. Förhållandet mellan längden av fibrernas projektion och fibrernas verkliga längd bestämmer formfaktorn. Analyser utförs vanligtvis med optisk apparatur eller alternativt med mikroskopbilder samt manuellt räknande och kvantifierande av olika deformationer (Ek et.al., 2009).

Oblekta kemiska massor har en mörkbrun färg som orsakas av kromoforer som finns i massan. Kromoforererna i sin tur härstammar från ligninrester. Många pappersprodukter såsom tryckpapper och livsmedelskartong kräver råmaterial med en hög ljushet. Blekningen av massan minskar ligninhalten och ökar därmed ljusheten. Som nackdel har blekningen att i och med en sänkt ligninhalt försämras viskositeten och därmed styrkeegenskaperna. Relationen mellan ljusheten och ligninhalten illustreras i figur 6 (Ek et.al., 2009).



Figur 6. Ligninhalten och ljusheten som funktioner av kemikalieförbrukningen per enhet massa (Ek et.al., 2009).

Massans viskositet är relaterat till polymerisationsgraden av kolhydrater. Under massakoket spjälks kolhydratkedjorna genom alkalisk hydrolys vilket leder till lägre viskositet. Sidoreaktionen är oönskad men oundgänglig. Ju lägre viskositet, desto mera har kolhydratkedjorna förkortats under massakoket. Selektiviteten av massakoket kan mätas med viskositeten. Eftersom cellulosakedjorna är mycket längre än hemicellulosakedjorna beskriver viskositetsvärdet cellulosans polymerisationsgrad. Figur 7 visar viskositeten som funktion av kappatalet. Kappatalet beskriver ligninhalten i massan.

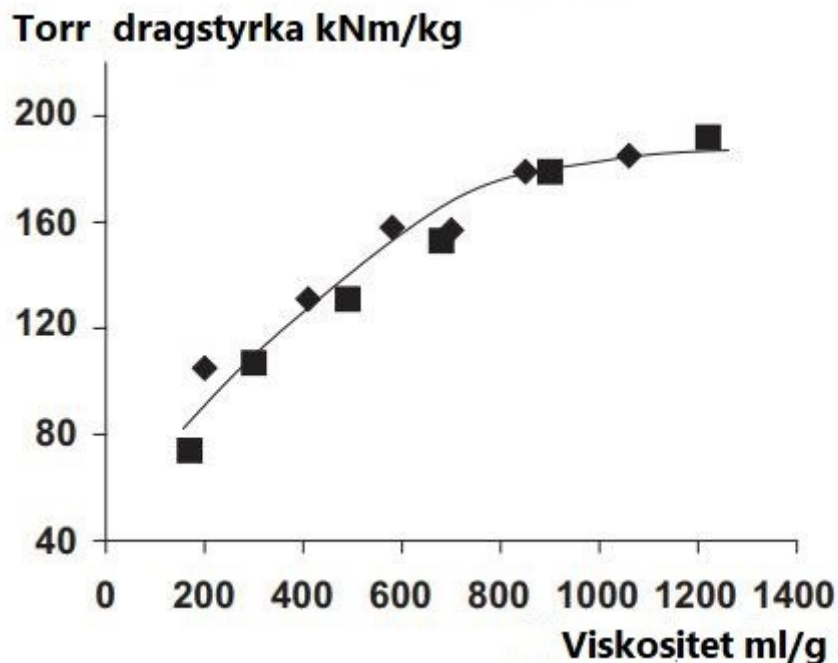


Figur 7. Massans viskositet som funktion av kappatalet (Ek et.al., 2009).

Viskositetens viktighet som egenskap beror på att den är starkt knuten till fiberstyrkan. Figur 8 visar hur dragstyrkan på torra fibrer utvecklas som en funktion av viskositeten. Viskositeten i figur 8 är mätt för slutprodukten, det vill säga helt blekt massa. Förlorad viskositet i ett



tidigare skede av processen kan inte återställas. Viskositeten måste bevaras genom varje enhetsoperation i processen.



Figur 8. Dragstyrkan för torra fibrer som funktion av viskositeten (Ek et.al., 2009).

### 3.1 Barrvedsmassa och lövvedsmassa

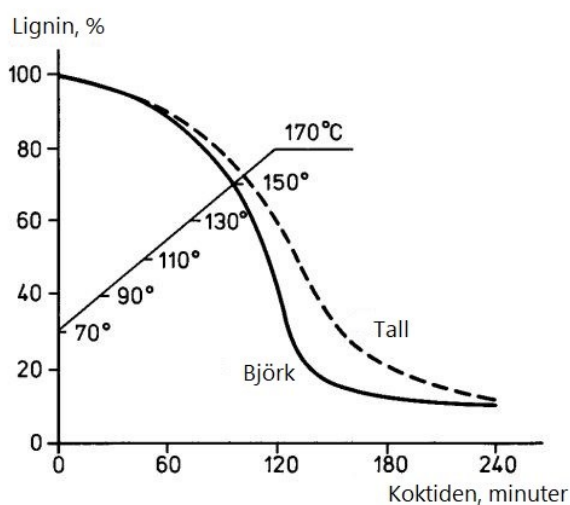
Fiberlängden hos barrvedsmassor är generellt tre till fyra gånger högre än hos lövvedsmassor. Till exempel har den skandinaviska tallen i genomsnitt en fiberlängd på 3,5 millimeter. Fiberbredden är 40 mikroner. Lövvedsmassor har vanligtvis en medelfiberlängd på cirka 1 millimeter. Fiberbredden är 20 mikroner (Shackford, 2003).

Kompositionen av de olika beståndsdelarna varierar mellan trädslagen. Lövved har en högre hemicellulosahalt och mindre halter extraktivämnen. Anmärkningsvärd är xylanhalten i lövveden som är 2,5-faldigt högre jämfört med barrveden. Miletzky et.al. (2013) upptäckte att rivstyrkan av pappret bestående av barrvedsfiber förbättras med ökad xylanhalt. Därmed kan en ökning av xylanhalten i massan tänkas kompensera för lövvedsmassans sämre styrkeegenskaper i pappret. Ved- och massakompositionen av tall och björk visas i tabell 2.

Tabell 2. Sammansättningen av tallved och björkved samt tallvedsmassa och björkmassa (Gullichsen et.al., 2000).

| Komponent         | Vedkomponenter |          | Kraftmassakomponenter |          |
|-------------------|----------------|----------|-----------------------|----------|
|                   | Tall, %        | Björk, % | Tall, %               | Björk, % |
| Cellulosa         | 38–40          | 40–41    | 35                    | 34       |
| Glukomannan       | 15–20          | 2–5      | 5                     | 1        |
| Xylan             | 7–10           | 25–30    | 5                     | 16       |
| Andra kolhydrater | 0–5            | 0–4      | -                     | -        |
| Lignin            | 27–29          | 20–22    | 2–3                   | 1,5–2    |
| Extraktivämnen    | 4–6            | 2–4      | 0,25                  | <0,5     |

På grund av olikheter i vedmorfologin har lövveden en högre delignifieringshastighet under koket än barrveden. Förutom den högre delignifieringshastigheten kan lövveden kokas till en lägre ligninhalt under vanliga kokförhållanden. Fibrerna frigörs genom att lösa upp mittlamellen. Frigörandet är snabbt eftersom ligninet i mittlamellen består mestadels av guaiacyl-lignin (Aurell, 1963). Skillnaden mellan kokhastigheter illustreras i figur 9. Produktionsparametrar påverkar produktionskostnaderna direkt. Prisskillnaden mellan de olika massorna härstammar dels från produktionskostnaderna. Andra faktorer med inverkan på priset är efterfrågan och tillgänglighet av lövved.



*Figur 9. Ligninhalten som funktion av koktiden för björkved och tallved (Aurell, 1963).*

## 4 Malning av fibrer

Malning av fibrer är en mekanisk behandling vars syfte är att utveckla fiberegenskaper och vidare pappersegenskaper. Fibrerna mals mellan metallbommar under olika kompressions- och skjuvkrafter. Malningen är en av de mest kritiska enhetsoperationerna i produktion av papper och kartong. På grund av styvheten och den släta ytan lämpar sig inte obehandlade fibrer som råvara för papper. Papper bestående av omalda fibrer innehåller inte tillräckligt med bindningar mellan fibrer. Arket som tillverkats av omalda fibrer är för poröst. Dessutom har arken en för låg ytjämnhet för att kunna tryckas eller beläggas. Målsättningen är därför att öka fibrernas benägenhet att skapa bindningar sinsemellan. Ibland eftersträvas förkortning av för långa fibrer, vilket förbättrar arkformationen. Även absorptionsförmågan, luftpermeansen och optiska egenskaper kan justeras att möta kraven som slutprodukten har. En av malningens nackdelar är att opaciteten och ljusheten försämras. Malningen är därför ofta en kompromiss mellan önskade och oönskade egenskaper (Paulapuro, 2000; Lumiainen, 2000).

Lövvedsfibrernas styrkeegenskaper utvecklas mycket snabbare under malning än barrvedsfibrernas. Rivhållfastheten och dragstyrkan är högre hos barrvedsfibrerna än hos lövvedsfibrerna. Emellertid uppvisar lövvedsfibrerna högre ljusspridningskoefficient och högre ljushet som är viktiga i vissa användningsområden. Allmänt har barrvedsfibrerna en god blandning av riv-, spräng- och dragstyrkor medan lövvedsfibrerna har överlägsen opacitet, bulk och släthet. Attributen som mest påverkar pappersegenskaperna för de olika fibrerna är för barrved en hög styrka och en bra körbarhet av pappersmaskinen samtidigt som lövvedsmassor ger en god formation, opacitet och släthet (Shackford, 2003).

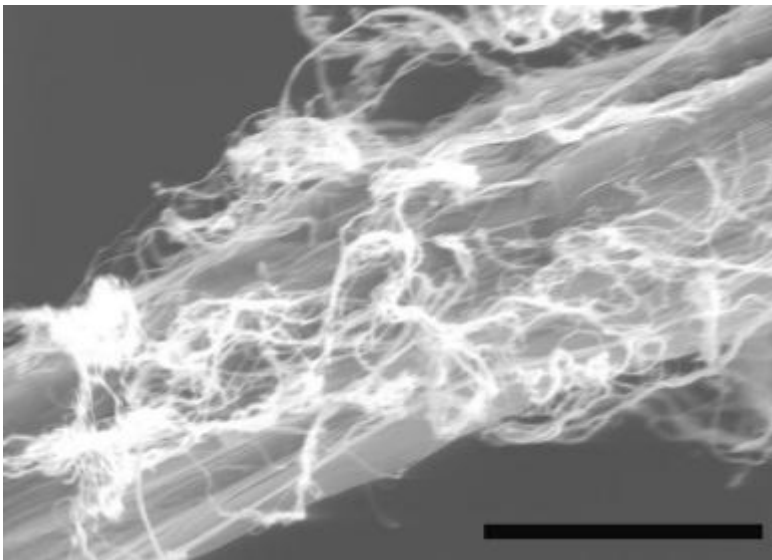
### 4.1 Malningens effekt på fibrer

Krafterna som fibrerna utsätts för under malningen bryter molekylära bindningar inom fibern vilket orsakar lossning av cellväggen (Lundin, 2008). Cellväggens förmåga att motta behandling är en viktig egenskap att överväga under dimensionering av garnityr.

Den första effekten som malningen har på fibern är intern fibrillering. Med intern fibrillering avses lossningen av fiberns inre skikt. Intern fibrillering orsakas av cykliska

kompressionskrafter mellan malningsgarnityrets bommar (Haavisto et.al., 2008). Intern fibrillering gör fibern mera flexibel. Flexibiliteten är ett nyckelattribut eftersom det styr de flesta fysiska och optiska egenskaperna. Flexibla och kollapsade fibrer möjliggör närmare kontakt mellan fibrer vilket bidrar till starka bindningar (Paavilainen, 1993).

Avlägsnandet av de två yttersta skikten av fibern kallas extern fibrillering. Fibriller som står kvar fästa i cellväggen bidrar till ökad bindningsförmåga genom att öka den specifika ytan av fibern. Den externa fibrilleringen är kontroversiell eftersom den är knuten till intern fibrillering och utformning av finmaterial. Bedömningen av externa fibrilleringens magnitud är svår på grund av de samtidiga förändringarna i fibern. Extern fibrillering illustreras i figur 10.



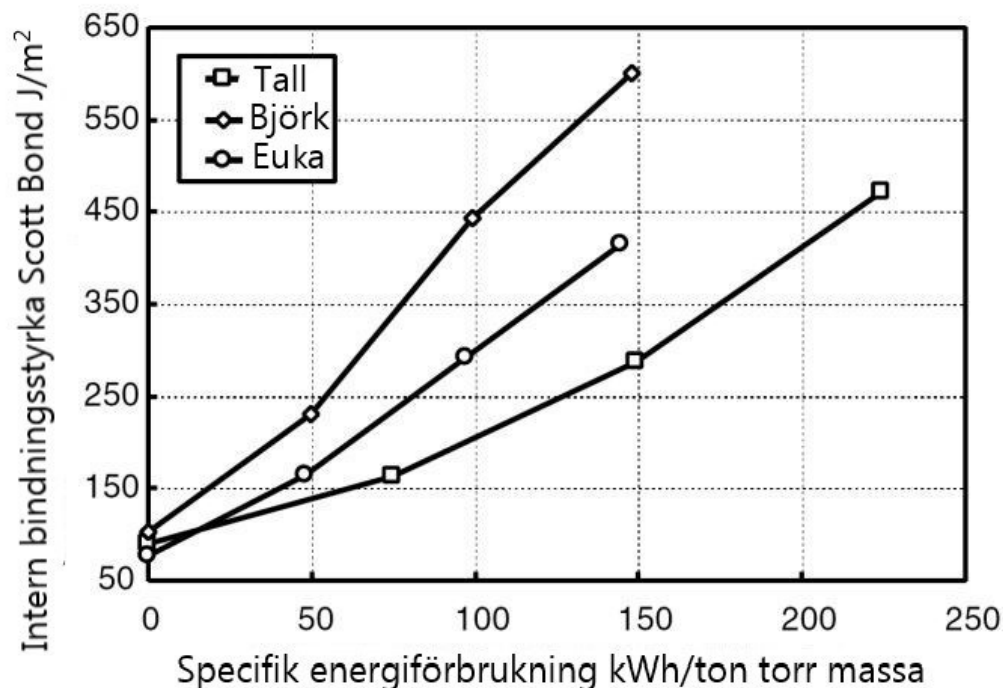
*Figur 10. Extern fibrillering på en engång-torkad blekt barrvedsfiber. Streckets längd motsvarar en längd på 20  $\mu\text{m}$  (Kang, 2007).*

Den malda fibermassan innehåller finmaterial av två olika slag. Primärt finmaterial finns i fibermassan redan före malningen och består av parenkymceller, strålceller och barkrester. Sekundärt finmaterial skapas under malningen genom extern fibrillering eller förkortning av fibrer (Hartman, 1984). Fragmenten av primära och sekundära cellskikt utgör det sekundära finmaterialet. En hög specifik yta för finmaterialet förbättrar formning av bindningar mellan fibrer. Emellertid har finmaterialet en negativ effekt på dräneringstiden. Halten av finmaterial är vanligtvis mindre än 2 %, men efter malningen kan finmaterialhalten öka ända upp till 15 % (Gharehkhani et.al., 2015).

Fiberkvaliteten förändras också då fibrer förkortas under malningen. Vanligtvis anses förkortningen att vara en oönskad konsekvens av malning. Kapning av fibrer äger rum då belastningen på fibern är tillräckligt stor. I vissa fall är förkortningen av fibrer en önskad konsekvens av malning. Korta fibrer ger en bättre formation av pappersbanan på grund av deras lägre benägenhet att bilda flockar. Pappersbanan är mera homogen och har en bättre släthet. Därmed betar sig förkortade fibrer mera likt lövvedsfibrer i papperstillverkning (Page, 1989).

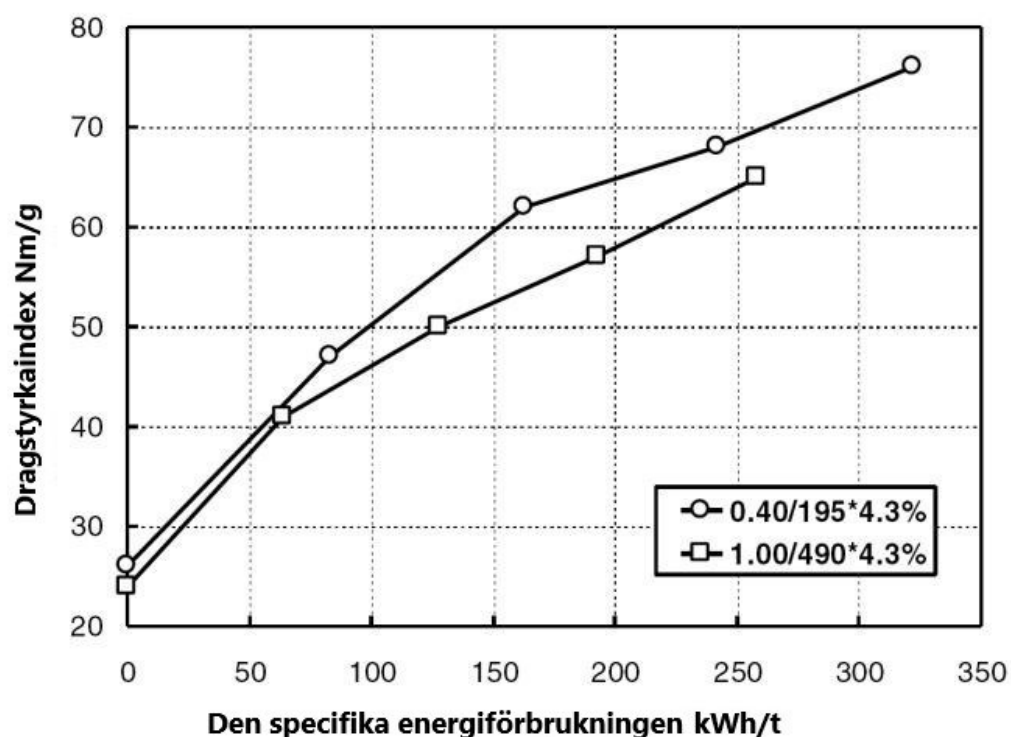
## 4.2 Malningens effekt på pappersegenskaper

Intern bindningsstyrka är en viktig egenskap för kalandrerade papperslag. En hög bindningsstyrka förebygger delamineringen av pappersarket under tryckning. Utvecklingen av intern bindningsstyrka som funktion av malningsenergin i form av den specifika energiförbrukningen illustreras i figur 11. Alla fiberslag uppvisar nästan linjärt beroende mellan den interna bindningsstyrkan och malningsenergin. Den interna bindningsstyrkan ökar mest hos papper gjort av björkvedsmassa.



Figur 11. Intern bindningsstyrka som funktion av den specifika energiförbrukningen (Page, 1989).

Figur 12 illustrerar hur dragstyrkan beror av den specifika energiförbrukningen då malningsintensiteten och konsistensen hålls konstanta. Dragstyrkan utvecklas längre då malningen utförs under lägre intensitet. Massan som användes i experimentet var blekt eukalyptusmassa. Malningsintensiteten för linjen med cirklar var 0,4 J/m och för linjen med fyrkanter 1,0 J/m. Massans konsistens var 4,3 % genom hela experimentet. Det minsta flödet var 605 L/min och då hade kvarnen nettoeffekten på 85 kW. Flödet ökades till 1 515 L/min och nettoeffekten ökades till 213 kW. Kvarnen var av typen JC-01 med ett garnityr avsedd för korta fibrer. Bommarna hade bredden 2,0 mm och roteringshastigheten 1 000 rpm (Lumiainen, 2000).

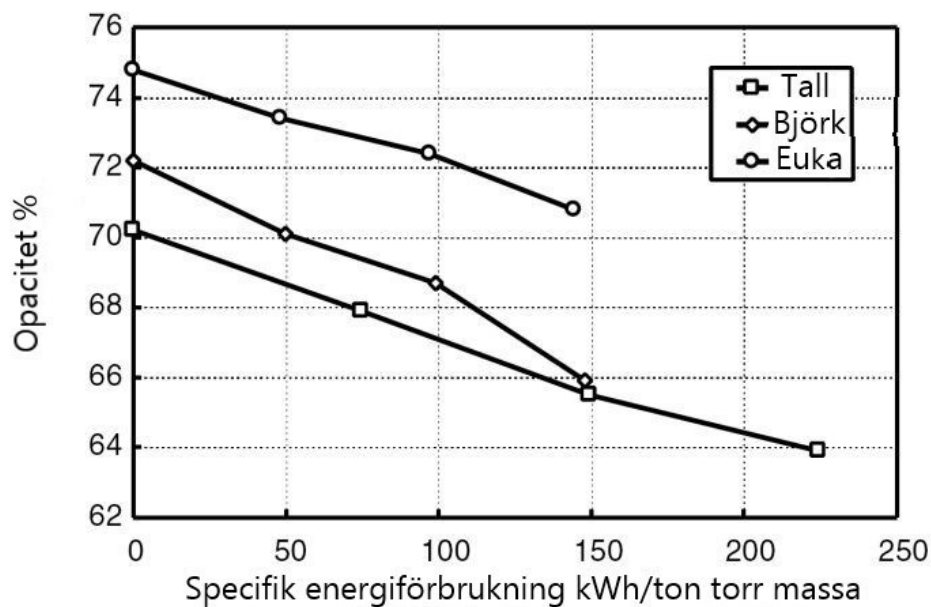


Figur 12. Dragstyrkeindexen som funktion av den totala malningseffekten i enhet kWh/t torr för två olika malningsintensiteter (Lumiainen, 2000).

Fiberlängden är en viktig egenskap av massan med tanke på papprets rivstyrka. Fall där bindningsstyrkan mellan fibrer är större än fiberns inre styrka skapar ett undantag. Det tyder på att fiberlängden är viktigt hos massor där bindningsstyrkan är lägre. I massor där fibrer har starka bindningar sinsemellan kan en hög fiberlängd även leda till försämring av rivstyrkan av pappersarket (Lundin, 2008). Fiberlängden är dock ingen egenskap som papperstillverkaren kan öka på. Massan som kommer till massaavdelningen har en viss

fiberlängd och operatör ansvarig för malningen kan endast minska på fiberlängden och homogenisera fiberlängddistributionen.

Optiska egenskaper är viktiga för papperslag vars vidareförädling innebär tryckning eller bestrykning. Ljushet definieras som reflektansen av ljus med våglängden 457 nanometer jämfört med en perfekt reflekterande yta. Opaciteten beskriver papprets förmåga att motverka ljusstrålarnas permeabilitet. Massans ljushet och opacitet försämras under malningen. Försämringen av de optiska egenskaperna är en oönskad följdverkan av malningen. De optiska egenskaperna kan bevaras till viss mån med kontroll av malningsenergin. Opacitetens beroende av den specifika energiförbrukningen illustreras i figur 13. Lövedsmassorna har ursprungligen högre opacitet än barrvedsmassor. Enligt figur 13 är opacitetens minskning dock lika snabbt för alla fiberslag.



Figur 13. Opacitet som funktion av den specifika energiförbrukningen (Page, 1989).

### 4.3 Malningsteori

Malningen styrs genom att flytta den roterande delen av garnityret i förhållande till den statiska delen av garnityret. Malspalten mellan bommar bestämmer kvarnens malningsenergi. Massan mottar malningsenergin från bommarna. Samtidigt förhindrar pappersmassan kontakt mellan bommarna. Då malspalten minskas ökar malningsenergin och analogt minskar malningsenergin med ett större malspalt. Kontroll av malningen är dock

inte så enkelt, utan heterogeniteten av malningen orsakar utmaningar. Med heterogenitet avses att vissa fibrer blir malda till en hög malningsgrad samtidigt som andra fibrer lämnar malkvarnen utan behandling. På grund av heterogeniteten kan ändringarna i malningsenergin inte direkt ändra på malningens slutresultat. Trots utmaningar, har det utvecklats malningsteorier och metoder vars syfte är att möjliggöra konsekvent kontroll av malningsförhållanden (Lumiainen, 2000).

Malningsenergin består av nettomalningseffekten och effektförlusten. Endast nettomalningseffekten belastar och utvecklar fibrer. Effektförlusten kan mätas med att operera kvarnen med endast vatten då garnityret är öppet. Förlusten  $P_n$  [kW] föreslås växa exponentiellt med kvarnens varvtal  $n$  [1/s] och den roterande garnityrets omkrets [mm] enligt följande formel (Lumiainen, 2000):

$$P_n = k \times n^{2,8} \times d^{4,5}$$

Konstanten  $k$  är en för garnityret specifik konstant som beror på garnityrgeometrin. Nettoeffekten  $P_e$  [kW] kan räknas genom att subtrahera effektförlusten från malkvarnens totala effektförbrukning  $P_t$  [kW] (Lumiainen, 2000). Nettoeffekten kan räknas med den följande formeln:

$$P_e = P_t - P_n$$

där  $P_e$  är netto-malningseffekten [kW]

$P_t$  är kvarneffekten [kW]

$P_n$  är effektförlusten [kW]

#### 4.3.1 Specifik kantbelastning

Specifik kantbelastning (eng. *Specific Edge Load*) är det mest kända malningsbegreppet inom pappersindustrin. Den specifika kantbelastningen beskriver hur mycket fibrerna blir



behandlade och hur intensivt de utsätts för stötningar. Den specifika kantbelastningen räknas enligt den följande formeln (Lumiainen, 2000):

$$SEL = \frac{P_e}{L_s}$$

där SEL är den specifika kantbelastningen [J/m]

$P_e$  är nettoeffekten under malningen [kW]

$L_s$  är garnityrets specifika skärningshastighet [km/s]

Enligt SEL-teorin sker malning av fibrer endast inom garnityret. Den totala längden av metallbommarna bestämmer hur mycket kvarnen kan belastas. Skärningshastigheten  $L_s$  ökar då bommarna är smala och tätt placerade. Då kan belastningen enligt teorin också ökas. Kvarnar med bredare bommar placerade med större mellanrum når samma malningsintensitet om belastningen på kvarnen är lägre (Koskenhely, 2007).

Kvarnens specifika skärningshastighet kan beräknas med den följande formeln (Lumiainen, 2000):

$$L_s = Ln = Z_r Z_{st} ln$$

där  $L$  är skärningslängd per rotation [km/r]

$n$  är rotationshastigheten av rotorn [ $s^{-1}$ ]

$Z_r$  är antalet bommar i rotorn

$Z_{st}$  är antalet bommar i statorn

$l$  är den längd där bommarna på rotorn och statorn är ovanpå varandra [km]

Den tillräckliga malningsintensiteten och bredden på bommarna beror på kvarntypen. Koniska kvarnar har bredare mellanrum mellan bommarna och högre malningsintensiteter än skivkvarnarna. Den passliga malningsintensiteten för barrvedsfibrer är mellan 2–6 J/m och för lövvedsfibrer 0,4–1,5 J/m (Lumiainen, 2000). Ett högt SEL-värde betyder en ökad tendens för förkortning av fibrer och ett lågt SEL-värde ger bättre fibrillering (Baker, 1995).

Malningsintensiteten beskriver hur mycket malningsenergi riktas på fibrerna i förhållandet till skärningslängden. Teorin tar dock inte ställning till hur fibrerna mottar malningsenergin. Dessutom tar teorin inte i beaktande bredden på mellanrummet mellan bommarna, garnityrets kondition, bredden på spåren mellan bommar, bredden på bommar eller malningskonsistensen. Intensiteten ger en enkel beskrivning om hur fibrerna belastas och kan användas för att kontrollera belastningen. Den används inom industrin parallellt med den specifika energiförbrukningen (Lumiainen, 2000).

#### 4.3.2 Specifik energiförbrukning

Den specifika energiförbrukningen (eng. *Specific Refining Energy*) används allmänt inom pappersindustrin. Den används för att beskriva mängden malningsenergi massan mottar under malning. Formeln nedan används för att bestämma den specifika energiförbrukningen (Koskenhely, 2007):

$$SRE = \frac{P_e}{FC} \quad (1)$$

där  $SRE$  är den specifika energiförbrukningen [kWh/t]

$P_e$  är malningens nettoeffekt [kW]

$F$  är massans strömningshastighet [ $m^3/h$ ]

$C$  är massans konsistens [ $t/m^3$ ]

Den specifika energiförbrukningen används ofta för att styra malkvarnen eftersom den tar i beaktande både massans strömningshastighet och konsistens som formeln (1) visar. Kvarnbelastningen och följaktligen malningsenergin kontrolleras med nämnda från formeln (1) – massaströmning och konsistens. Massaströmningen är direkt proportionellt mot pappersmaskinens hastighet. SRE-kontrollen används för att bibehålla belastningen på fibrer konstant. Då massaströmningen lokalt minskar ökas malspalten. På ett motsvarande sätt minskar malspalten då massaströmningen ökar. Malningsresistansen och målsättningen för malningsresultatet bestämmer malningsenergin som oftast varierar mellan 25 och 200 kWh/ton torr massa (Lumiainen, 2000). Om högkonsistensmalningen används kan den

specifika energiförbrukningen uppgå till 270 kWh/ton torr massa. Om större mängder energi behövs för att nå målsättningen måste flera malningssteg kopplas i serie.

Eftersom SRE-kontroll inte innebär styrning av kvarnens rotationshastighet påverkar förändringarna i den specifika energiförbrukningen även malningsintensiteten. Detta bör tas i beaktande då pappersmaskinens produktionsnivå ändras. Då massaströmningen växer eller minskar måste den önskade specifika energiförbrukningen justeras för att minimera fluktuationer på malningsintensiteten (Koskenhely, 2007).

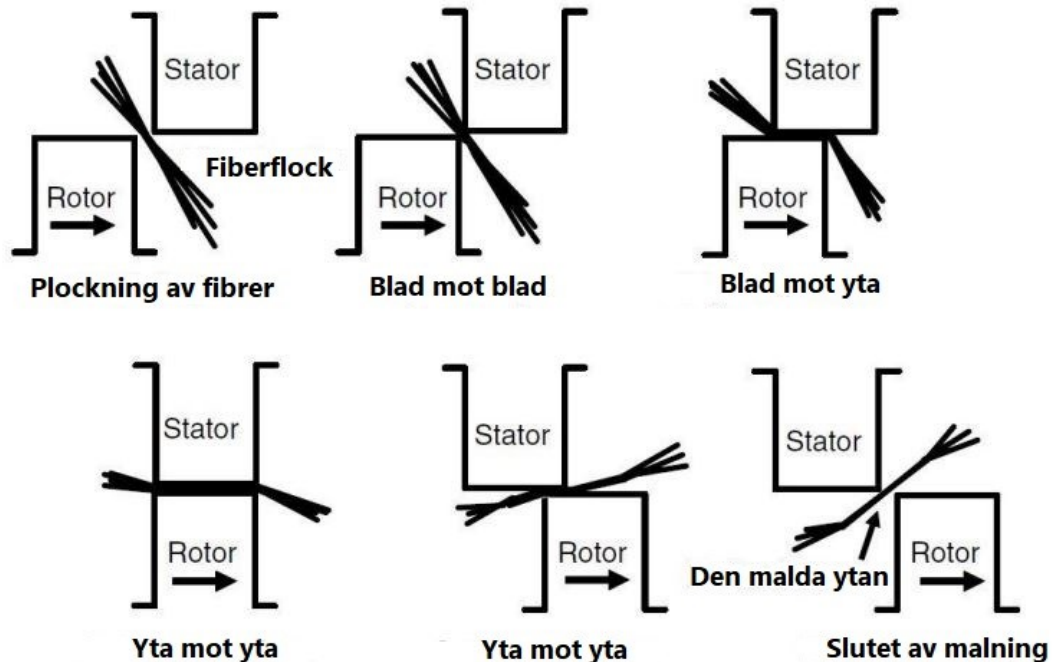
#### 4.3.3 Flockmalningsteorin

Hypotesen om malning i flockar innebär att fibrer mals i flockar. Konsistensen i lågkonsistensmalningen varierar mellan 2–6 % och under den konsistensen kan fibrerna inte röra på sig självständigt. I stället för enskild rörelse formar fibrerna flockar som kontinuerligt formas och bryts ned. Skjuvkrafterna som råder i spår och malningszonen styr forandet och nedbrytandet av de nämnda fiberflockarna. Tjockleken på flockarna är mellan 1–5 mm medan malspalten är betydligt mindre med 50–150 µm (Lumiainen, 2000).

På grund av storleksskillnaden är sannolikheten för att en flock träffar spåren mycket låg. Samtidigt är volymströmmen i malspalten mycket mindre än volymströmmen i spår i rotorn och statorn. Skillnaden mellan volymströmmarna leder till ett heterogent malningsresultat. Vissa fibrer får mycket behandling medan andra får ingen behandling alls. Följaktligen förbrukas det mycket energi för att transportera fiberflockar genom kvarnen (Lumiainen, 2000).

Malningen kan delas i två faser: selektion och behandling. Figur 14 illustrerar malningen stegvist. Virvelflödena inom spåren lyfter fiberflockarna på den roterande bommens kant. Spåren måste vara tillräckligt breda så att fibrerna har rum att rotera. I det första steget fastnar fiberflocken på den roterande bommens kant. Fiberflocken består mestadels av vatten. Då den roterande bommen närmar sig den statiska bommen hamnar fiberflocken under kompression och utsätts för ett starkt mekaniskt slag. Som följd avlägsnas vatten och en del av fibrerna lossnar från flocket och hamnar i spåren mellan de roterande bommarna. Endast fibrerna som står kvar i flocken mottar behandling. Flocken består vanligtvis av 2–5 svullna fibrer eller 10–20 kollapsade fibrer. Då bommarna ligger ovanpå varandra utsätts fiberflocken för tryckkrafter och friktionen inuti fiberflocken orsakar fiber-mot-fiberbehandling. Den malda fiberflocken hamnar i spåren mellan bommarna efter malningen

och förs vidare inom kvarnen. De ovannämnda faserna sammanlagt genererar en malningseffekt. Längden av malningseffekten beror på både bredden på bommarna och skärningsvinkeln mellan bommarna (Lumiainen, 2000).



Figur 14. De olika malningsstegen (Lumiainen, 2000)

Enligt Baker, 1995 skyddar barrvedsfibrerna lövvedsfibrerna i blandad malning och mottar därmed majoriteten av malningsenergin. Då lövvedshalten i blandad malning underskrider 25 % kan man enligt Canfor, 2010 betrakta malningsförhållanden som om massan enbart bestod av barrvedsmassa. Hypotesen stöds av en forskning av Nugroho, 2012 där lövvedsmassa och barrvedsmassa maldes i blandad malning vid olika bredder på malspalten. Under samma processförhållanden hade både ren barrvedsmassa och en blandning av 75 % barrvedsmassa och 25 % lövvedsmassa näst intill identiska malningsenergier. Därmed följer att den specifika energiförbrukningen för lågkonsistensmalning av enbart barrvedsmassa är något högre än den som användes under blandad malning. Enligt Canfors, 2010 teori kan nettoeffekten av lågkonsistenskvarnar som används vid malning av barrvedsmassa bibehållas konstant. Den behövliga specifika energiförbrukningen för barrvedsmassan kan multipliceras med en faktor bestående av förhållandet mellan den tidigare och den nya produktionsnivån. För lövvedshalter högre än nämnda 25 % kan inte samma resonemang direkt användas för att estimerar malningsenergin som barrveden mottar då den mals ensam.

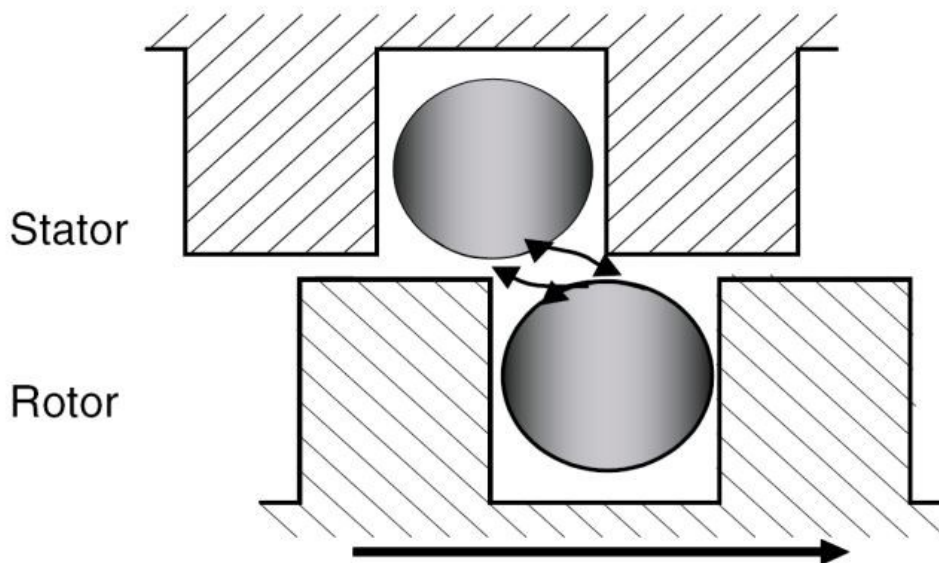
## 4.4 Malningsparametrar

Ett antal variabler påverkar både malningsparametrarna och malningsresultatet. En del av variablerna är fiberbaserade vilket gör att de inte kan ändras under malningen. Processomständigheter såsom pH, temperatur och tryck kan kontrolleras till viss mån med beaktande av andra delprocesser som beror på variablerna. Till exempel är den optimala pH-nivån under högkonsistensmalningen inte optimal för vissa tillsatämnen vilket kan synas som ett försämrat vattenabsorptionsvärde i senare laboratorieanalyser.

Parametrar som är helt förbestämda av användaren är kvarnkonfigurationen, apparaturen och garnityrgeometrin. Då malningssystemet planläggs kan rotationshastigheten och rotationsdirektionen väljas på ett sätt som gynnar produktionen på anläggningen. Den enda variabeln som nästan fritt kan styras under vanlig produktion är malspalten. I fall där ett återcirkulationssystem finns tillgängligt kan även flödet genom kvarnen kontrolleras (Lumiainen, 2000). Utan återcirkulation är flödet bundet till produktionsnivån om inte kvarnarna partiellt passeras.

### 4.4.1 Konsistens

Konsistensen borde inte beaktas som en självständig variabel eftersom den är starkt knuten till geometrin hos garnityret. Ett garnityr med grövre mönster och bredare spår fungerar optimalt under en högre konsistens av massan. Ett fint mönster med smala spår mellan bommarna fungerar bäst med en lägre konsistens. Förklaringen för detta fenomen ligger bakom virvelflöden som finns i spåren. Virvelflöden i spåren illustreras i figur 15. Massan med hög konsistens betar sig långsammare i virvelflöden. Tendensen till flockning ökar med långsammare virvelflöden eftersom krafterna i svaga virvelflöden inte bryter ned flockarna tillräckligt effektivt. Det grövre garnityrmönstret passar bättre för malning av flockar (Lumiainen, 2000).



Figur 15. Virvelflöden i spåren. De gråa cirklarna inom spåren mellan bommarna illustrerar virvelflöden som styr fiberflockarna mot kanter av bommarna (Lumiainen, 2000).

Vanligtvis ligger konsistensen vid 3,5 %-4,5 % för barrvedsmassan och vid 4,5 %-5,0 % för lövvedsmassan. Om konsistensen sjunker under 3 % är risken att förkortningen av långa barrvedsfibrer intensifieras. Effekten är den motsatta för lövvedsfibrer som under låg konsistens bildar svagare flockar. Då fiberflocken på den roterande bommens kant möter kanten på den statiska bommen lossnar en större andel av fibrerna och faller i spåren. De fibrer som fallit i spåren mottar ingen malning. I fall där garnityrgeometrin och mönstret inte är optimala för den tillgängliga massan är konsistensen på massan den enda parametern som kan ändras (Lumiainen, 2000).

#### 4.4.2 Malningsintensitet

Den optimala intensiteten för malning av kemiska massor beror på fibrernas fysiska dimensioner, resistansen för malning och flockningstendensen. Intensiteten måste bestämmas utgående från ursprungliga fiberegenskaper och målsättningen för malningen. I malning av lövvedsmassor kan redan en låg intensitet utveckla fibrerna. Emellertid minskar även tomgångseffektens andel. I höga malningsintensiteter i sin tur förstörs fiberflockarna på bommens kant och de lossnade fibrerna faller i spåren utan att motta någon behandling. Om fiberflocken inte bryts ned ökar också förkortningen av fibrer. Förkortning av de redan korta lövvedsfibrerna är inte önskvärt med tanke på förkortningens inverkan på fibrernas styrkeegenskaper (Lumiainen, 2000).

#### 4.4.3 pH

Vattnets penetrationsförmåga i fibrer beror på pH-nivån. Den optimala pH-nivån är nära neutral eftersom en för låg pH-nivå hindrar vattnets penetration och en för hög pH i sin tur gör fibrerna hala. Fiberflockarna fastnar inte på kanter av de roterande bommarna och lämnar kvarnen utan att motta behandling. Friktion mellan fibrer behövs även för skjuvningen då fiberflocken är i malspalten. Bristfällig friktion i basiska förhållanden orsakar en misslyckad malning. Då pH-nivån är under fem ökar förkortningen av fibrer och finmaterialbildningen (Lumiainen, 2000).

## 5 Processbeskrivning

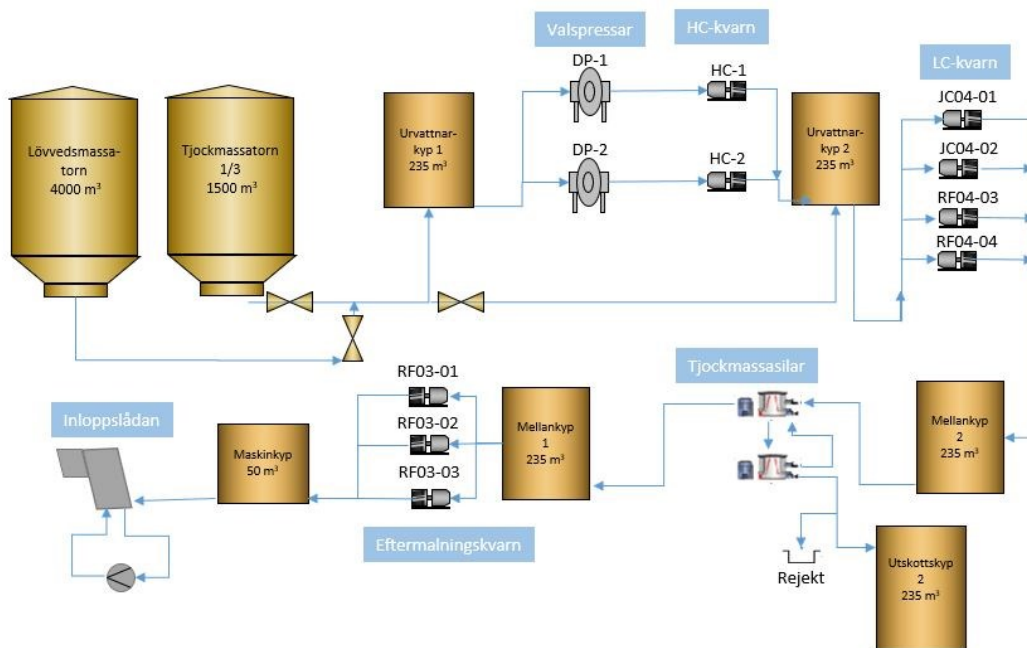
Pappersfabriken i Jakobstad är den världsledande producenten av säck- och kraftpapper. Pappret används hos kunderna i tillverkning av till exempel mjöl- och sockerpåsar, kemikalie- och fodersäckar och till tekniska lösningar såsom sandpapper och vätskekartong. Produktionen började år 1962 och pappersmaskinen renoverades under 1998 då nya press- och virapartier installerades. Pappersbruket är integrerat i UPM:s massafabrik och opererar parallellt med två UPM-ägda torkmaskiner. Den årliga produktionskapaciteten är i nuläget cirka 200 000 ton. Pappersmaskinen är 112 meter lång och har en banbredd på 6 500 mm.

Pappersslagen som produceras är UG, MF och säckpapper. UG är icke-kalandrerat, poröst papper som används främst i påsar. Säckpapper i allmänhet har hög draghållfasthet och luftgenomsläpp. Det kalandrerade MF-pappret används som råmaterial i krävande specialprodukter såsom tryckta eller belagda finpapper. Utvecklade optiska egenskaper i MF-pappret uppnås genom användning av lövvedsmassa som råmaterial i pappret. Lövvedsmassans andel i MF-pappret varierar mellan 10 och 50 %. Processbeskrivningen har gjorts framför allt med tanke på MF-pappret.

### 5.1 Malning av massa i nuläget

I nuläget blandas lövvedsmassan med barrvedsmassan före malningen. Lövvedsmassan mals i blandad malning genom hela malningsprocessen. Blandning av de två massorna görs i rörledningen före urvattnarkyp 1. Urvattnarkyp 1 har en omrörare i botten av kypen som förutom att blanda de två massorna även håller konsistensen i kypen jämn. Pumpar vid botten av urvattnarkyp 1 används för att pumpa massan till valspressar. Alternativt kan

massan pumpas förbi högkonsistensmalningen direkt till urvattarkyp 2. Figuren 16 visar hur massan förbehandlas i dagens läge i Jakobstads fabrik.



Figur 16. Processfigur av malning av massan vid PK1 i Jakobstad. (Forsslund, 2020)

Högekonsistensmalning (eng. *High consistency refining*) innebär malning där konsistensen på massan är mellan 30–35 % under malningen. En hög torrhalt fås med hjälp av valspressar som pressar ut vattnet före den egentliga malningen. På grund av interaktionen mellan fibrer blir antalet formförändringar stort under högekonsistensmalningen. Antalet mikrokompressioner i fibrer ökar med torrhalten. Efter malningen späds massan ut med vattnet utvunnet från valspressarna (Sjöberg, 2005). HC-malningen utförs med skivkvarnar. I skivkvarnar är garnityret i form av skivor positionerade vertikalt i förhållande till motoraxeln. En skivkvarn från Andritz illustreras i figur 17.





Figur 17. En HC-skivkvarn från Andritz (Andritz, 2022).

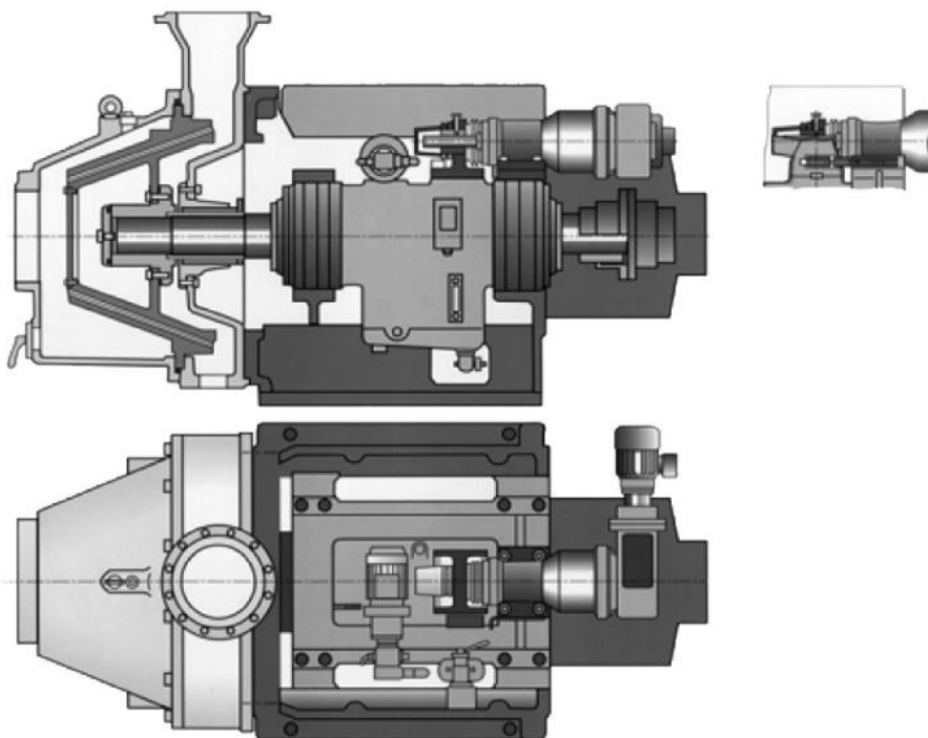
Vid produktion av pappersslag som inte behöver högkonsistensmalning kan massablandningen ledas förbi urvattnarkyp 1 direkt till urvattnarkyp 2. Alternativt kan massablandningen ledas genom urvattnarkyp 1, valspressar och högkonsistenskvarnar med öppen malspalt på högkonsistenskvarnar. I ett sådant körsätt förbrukar högkonsistenskvarnen dock energi i form av tomgångsförbrukning. Till exempel är det inte nödvändigt att helt stänga av högkonsistenskvarnar om driftsschemat innehåller ett pappersslag utan HC-malning mellan HC-malda pappersslag.

HC-malningen gör fibrer krusade och kinkveckiga vilket orsakar en låg densitet i pappret. Därmed måste högkonsistensmalningen följäs med en eller flera lågkonsistensmalningssteg. Som en påföljd av lågkonsistensmalningen riktas fibrerna och bindningsbenägenheten förbättras. Krusiga fibrer har en försämrade dragstyrka som förbättras då fibrerna åter blir raka. Densiteten utvecklas till den slutliga nivån då fibrerna riktas och kan såvida packas närmare varandra (Lumiainen, 2000).

Termen lågkonsistensmalning (eng. *Low consistency refining*) innefattar behandlingen av massan under en konsistens mellan 2–6 % och en periferihastighet mellan 15–25 m/s. Koniska kvarnar används vanligtvis i lågkonsistensmalning av kemisk massa. Både rotern och statorn i koniska malkvarnar är konformade. En hög yta-volymförhållande möjliggör en lång

sammanlagd längd på bommar i garnityret. Massan styrs in i kvarnen från den smalare ändan av konen. Malningen sker i malspalten och massan fortsätter genom kvarnen till utmatningsröret som finns i den breda ändan av konen. Under malningen förmedlas kraften från motorn som mekanisk energi på fibrerna. Krafterna som råder är komplexa skjuv- och tryckkrafter (Lumiainen, 2000).

Fabriken i Jakobstad använder fyra koniska LC-kvarnar av tillverkaren Sunds Defibrator (numera Valmet). De fyra parallellkopplade LC-kvarnarna ligger mellan urvattnarkyp 2 och mellankyp 2. Malkvarn är av typen Conflo har grunda spår vilket bidrar till en låg tomgångseffekt (Baker, 1995). En konisk malkvarn av typen Conflo™ från tillverkaren Valmet illustreras i figur 18.



*Figur 18. En konisk malkvarn av typen Conflo från Valmet (Lumiainen, 2000).*

I pappersbruket styrs malningen enligt sugvalsens undertryck på virapartiet. Undertrycket korrelerar med papprets luftpermeans vilket i sin tur korrelerar positivt med malningsgraden. Den mest långsamma signalen för kontroll av malning är pappersegenskaper som mäts i laboratoriet. Syftet med kontroll av malning är att pappersegenskaperna når de värden kunden har specificerat. Malningseffekten styrs i praktiken inom kvarnen genom att styra rotorns position i förhållande till statorn.

Vanligtvis styrs malningen automatiskt på basen av den specifika energiförbrukningen. En krets räknar den specifika energiförbrukningen i enhet netto kWh/ton torr massa baserat på nettomalningsenergin, massaflödet och konsistensen. Kretsen ger referenssignalen till en krets som styr malspalten. Tomgångseffekten måste subtraheras från den totala energiförbrukningen för att ta i beaktande energin som inte främjar malningen. Efter att man ställt in den specifika energiförbrukningen följer systemet flöden och konsistensen och styr kvarnbelastningen automatiskt (Lumiainen, 2000).

Tjockmassasilarna mellan mellankyparna rensar massan från främmande partiklar. Eftermalningskvarnarna före maskinkypen används för att justera malningen. De ger upphov till snabba reaktioner på variationer i massans egenskaper på grund av deras läge nära inloppslådan. Det finns tre parallellkopplade eftermalningskvarnar som alla är av samma typ. Eftermalningskvarnarna fungerar på samma sätt som LC-kvarnarna, men i mindre skala och i ett senare skede av processen. Även garnityret som används i eftermalningskvarnarna är mycket lik det som används i LC-kvarnarna. I maskinkypen späds massan till rätt konsistens före den matas till inloppslådan.

## 5.2 Föreslagen malningsprocess för lövvedsmassa

Lövvedsmassorna som eukalyptusmassa och björkvedsmassa har traditionellt använts som fyllningsmassor med endast lite malning. För att kunna utveckla lövvedsmassornas egenskaper till deras fulla potential måste malningen utföras under en lätt belastning. Björkvedsmassa har den bästa styrkan av lövvedsmassorna. Följande malningsförhållanden rekommenderas för lövvedsmassor allmänt:

- En låg intensitet med SEL-värdet mellan 0,5–1,0 J/m för en bra balans mellan egenskaper (Baker, 1995).
- Relativt höga SRE-värden upp till 80 kWh/ton torr massa för att utveckla styrkeegenskaperna (Lumiainen, 2000). För eukalyptus behövs ett högt SRE-värde för att utveckla rivningsstyrkan (Baker, 1995).
- Malningskonsistenser mellan 4–6 % för att undvika förkortningen av fibrer och öka på fiber-mot-fiberfriktion (Lumiainen, 2000).
- Bommens vinkel med den radiella riktningen är 20 grader (Lumiainen, 2000).

- Spårbredden mellan 2,5–3,5 mm, spårdjupen 7,0 mm och bredden av bommen mellan 2,0–3,0 mm (Lumiainen, 2000).

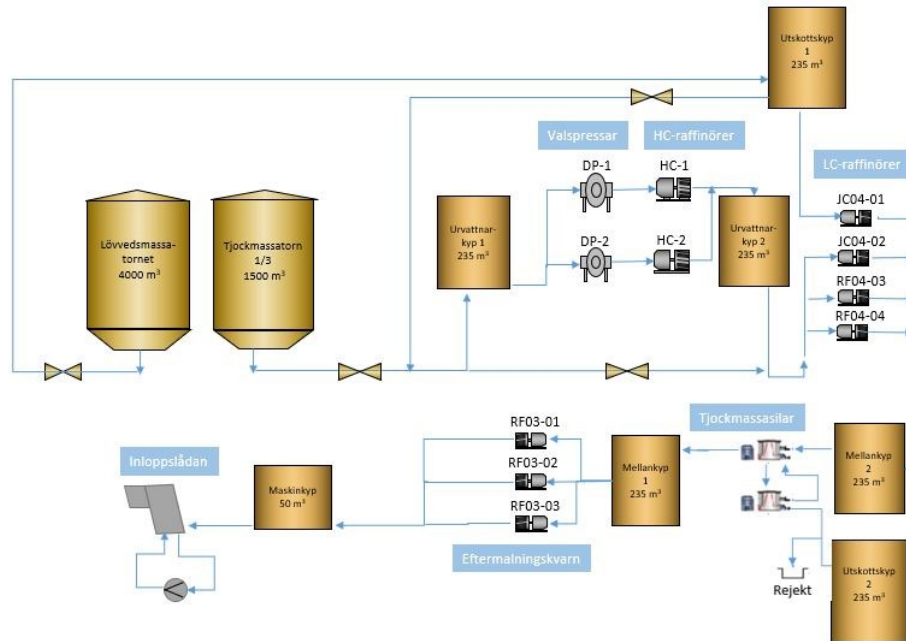
Garnityret avsett särskilt för lövvedsmassa planeras att installeras i LC-kvarnen 1. De tekniska specifikationerna visas i tabell 3. LC-kvarnen 1 klarar av att hantera 200 liter massa per sekund med konsistensen 4,2 %. Den maximala motoreffekten är 1 200 kW varav 200 kW är tomgångseffekt. För att nå en hög verkningsgrad måste nettoeffekten vara så stor som möjligt. Detta kan betyda endera högt specifikt energiförbrukning för mindre produktionsnivå eller lågt specifikt energiförbrukning för större produktionsnivå. Det minimala volymflödet enligt tabell 3 är 40 liter per sekund vilket motsvarar en produktionsnivå av sex ton papper per timme. Om flödet underskrider 15 liter per sekund öppnas malspalten och malningen avstannas. Den minimala volymflöden i kvarnen är problematisk hos pappersslag vars produktion förbrukar lövvedsmassa under sex ton per timme. Till exempel kalandrerat papper med ytvikten 90 gram per kvadratmeter har en förbestämd produktionsnivå på 30 ton per timme. Om den önskade lövvedshalten för pappret vore 15 % motsvarar det endast en förbrukning av lövvedsmassa på 4,5 ton per timme. Separat malning av lövvedsmassa för ett sådant pappersslag är inte möjligt med kvarnen i fråga.

*Tabell 3. Data för LC-kvarn 1 modell JC-01.*

|                            |         |                        |
|----------------------------|---------|------------------------|
| Kvarndata                  |         | JC04-01                |
| Motoreffekten              |         | 1 200 kW               |
| Rotationshastighet         |         | 8,3 1/s                |
| Tomgångseffekt             |         | 200 kW                 |
| Kvarneffekten              |         | 1 200 kW               |
| Nettoeffekten              |         | 1 000 kW               |
| Flödet                     | minimum | 40 l/s                 |
|                            | maximum | 200 l/s                |
| Konsistens                 | %       | 4,2                    |
| kg/s                       | minimum | 1,7                    |
|                            | maximum | 8,4                    |
| t/h                        | minimum | 6                      |
|                            | maximum | 30                     |
| Specifik energiförbrukning | minimum | 33 kWh/ton torr massa  |
|                            | maximum | 167 kWh/ton torr massa |

Efter den föreslagna processförändringen skulle lövvedsmassan från lövvedsmassatornet ledas till utskottskyp 1. Från utskottskyp 1 kunde massan pumpas till lågkonsistenskvarnen 1 där det specifikt för lövmassa avsedda garnityret är installerat. Den malda lövvedsmassan blandas med barrvedsmassan i mellankyp 2. Som figur 19 visar passerar lövvedsmassan båda urvattnarkyperna. Det innebär att i den föreslagna processen kommer lövvedsmassan inte alls att malas med HC-kvarnar utan endast med en LC-kvarn och de senare eftermalningskvarnarna. Malningen i eftermalningskvarnar sker som tidigare i en blandad malning.

Utskottskypen 1 som förut fungerat som en del av utskottshantering har planerats att hålla kvar rörledningarna som kopplar den till utskottssystemet. Vid banbrott kan utskottskypen 1, som tidigare, användas för att öka utskottskapaciteten. Primärt är utskottskypen 1 avsedd för att användas i behandling av lövvedsmassa vilket innebär att en viss mängd av massa alltid finns i kypen. Därmed har kypen i fortsättningen en minskad kapacitet att lagra utskott under banbrotten.



Figur 19. Processfigur av malning av massan vid PK1 i Jakobstad efter processändringen. (Forslund, 2020)

Kontrollen har planerats att utföras även i fortsättningen genom den specifika energiförbrukningen som justeras enligt sugvalsens undertryck och laboratorieresultat. Den genomsnittliga specifika energiförbrukningen av både LC- och HC-malning för kalandrerade pappersslag i den tidigare malningsprocessen kan används som stöd då körsättet för den nya processen utvecklas. Lövvedsmassans separata malning innebär vissa ändringar i SRE-värdet för både barrvedsmassans och lövvedsmassans malning.

SEL-värdet som beskriver malningens intensitet bör kontrolleras noggrant för att det optimala malningsresultatet kan uppnås. En för hög intensitet kan förkorta lövvedsfibrerna eller lämna en del av fibrerna utan behandling. Dessa oönskade effekter orsakar försämrade styrkeegenskaper. Apparaturen och programvaran ger tillgång till SEL-värdet i realtid vilket underlättar kontrollen.

### 5.3 Hantering av utskott

Utskottet hos pappersmaskinen består av defekta rullor som uppslagits, utskott från pappersmaskinen, längdskäraren och omrullningsmaskinen och botten av maskinrullor. Utskottet uppslås och tillsätts till massan bestående av jungfrulig fiber. Utskottet bestående

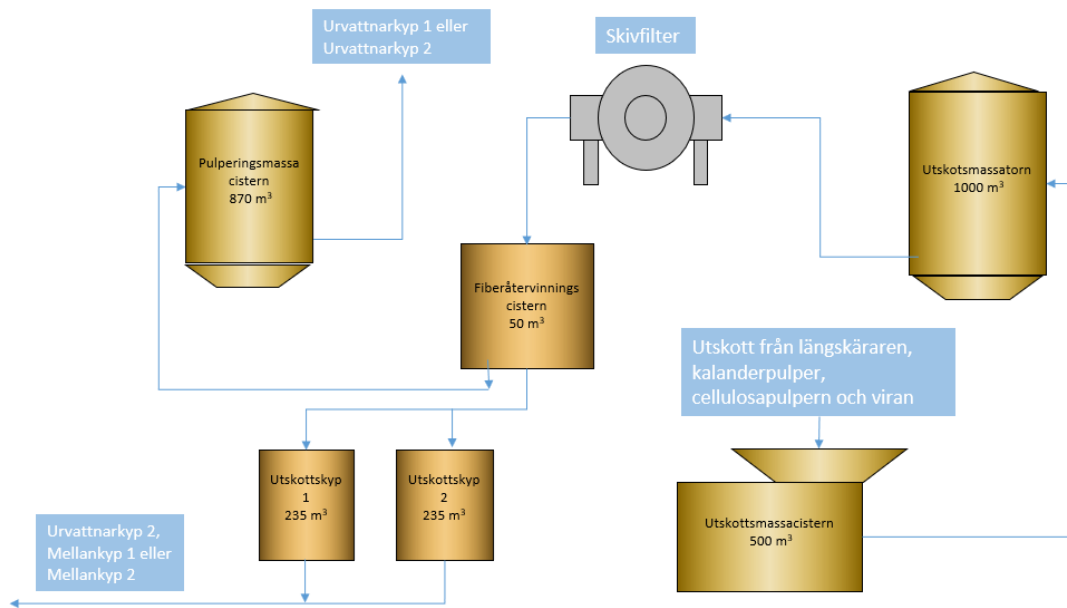
endast av kantband från de ovannämnda källorna ger ett utskottsflöde av 15–20 liter per sekund med konsistensen 4 %. För att undvika ackumulering av utskott i systemet måste ett 20 liters flöde upprätthållas. Övre gränsen för utskottflödet ligger mellan 70–80 liter per sekund på grund av pumpens kapacitet. Följande formel kan användas för att räkna ut utskottsprocenten:

$$\text{Utskottsprocent} = \frac{\text{Utskott} \left[ \frac{\text{l}}{\text{s}} \right] \cdot \text{Densitet} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{l}} \right] \cdot \text{Konsistens} \left[ \frac{\text{kg torr massa}}{\text{kg utskott}} \right] \cdot 3600 \left[ \frac{\text{s}}{\text{h}} \right] \cdot 0.001 \left[ \frac{\text{t}}{\text{kg}} \right]}{\text{Produktion} \left[ \frac{\text{t}}{\text{h}} \right]} \cdot 100 \%$$

Vid en produktionsnivå på 30 ton per timme utgör utskottsflödet 20 liter per sekund 9,6 % av produktionen då utskottets densitet approximeras ligga vid 1 kg per liter. Ett 80 liters utskottsflöde utgör 38,4 % av produktionen utifrån samma antagande som vid den föregående beräkningen.

Utskottssystemet efter de föreslagna processändringarna illustreras i figur 20. Utskottet från längdskärarnas pulperenheter samt utskottet från utskottspulpern pumpas till utskottsmassacisternen dit även utskottet från pappersmaskinen hamnar. Skivfiltret separerar vatten från utskottet. Vatten tas ur skivfiltren i form av filtrat av olika renheter. Filtraterna används bland annat till rengöring av pressfilter och spädning av massafraktioner. Massan som från skivfiltren leds till fiberåtervinningscisternen har konsistensen 5 %. Förut har massan från fiberåtervinningscisternen späts ut till konsistensen 4 % och pumpats vidare från utskottskyparna.

Den nya delen i utskottssystemet är pulperingsmassacisternen vars höga volym ökar på utskottssystemets kapacitet. En ny rörledning från fiberåtervinningscisternen möjliggör pumpandet av utskottet till pulperingsmassacisternen. Utskottssystemets kapacitet hittills har orsakat problem vid banbrott då den inkommande utskottsströmmen är stor. Överflödet av utskottskyparna är olönsamt både ekonomiskt och ekologiskt. Pulperingsmassacisternen kan lagra 870 kubikmeter massa vilket med konsistensen 5 % och antagen densitet 1 000 kg per kubikmeter motsvarar cirka 43 ton torrt papper. Med en produktionsnivå på 30 ton per timme motsvarar pulperingsmassacisternens kapacitet cirka 90 minuter mera tid för att återuppta produktionen utan överflöde av utskottssystemet.



Figur 20. Utskottssystemet i Jakobstads bruk.

## 6 Tekno-ekonomisk analys av återbetalningstiden

Det primära målet med den separata malningen av lövvedsmassa är att minska på produktionskostnaderna. De potentiella besparingarna utgörs av två faktorer: minskning av energibehovet vid malning och minskning av råmaterialkostnader.

Som kapitlet 5.2 visar, kommer lövvedsmassan i den planerade processförändringen inte alls att malas med HC-kvarnar utan endast med LC- och eftermalningskvarnar. Den minskade mängden massa som mals i HC-kvarnar möjliggör en minskning i kvarneffekten då den specifika energiförbrukningen i HC-malningen bibehålls på den tidigare nivån. Ingen teori som tar ställning till hur lövvedsmassan och barrvedsmassan beter sig under blandad HC-malning hittades. Återbetalningstiden är beräknad utifrån antagandet att malningsenergin under HC-malningen hittills har fördelats jämnt mellan lövvedsmassan och barrvedsmassan.

Även om behovet av malningsenergi minskar på grund av en minskning i massaströmmen till HC-kvarnar blir tomgångseffekten av LC-kvarnar större i och med att lövvedsmassa och barrvedsmassa nu mals med separata kvarnar. Tomgångseffekten existerar oberoende av storleken på massaströmmen genom kvarnen. Denna effekt kompenseras hos vissa



pappersslag genom en minskning i HC-kvarnars tomgångseffekt: i och med att massaströmmen i HC-malningen minskar kan den andra kvarnen stängas av vilket halverar HC-kvarnarnas tomgångseffekt. På grund av HC-kvarnens stora effektbehov kommer elektriciteten till kvarnen genom en transformator vars verkningsgrad påverkar HC-kvarnens verkliga tomgångseffekt med en viss faktor. Den föregående delprocessen före HC-malningen är valspressen som också kan stängas av som obehövlig vilket bidrar till större besparing i elförbrukning. Sammanlagt bidrar dessa två faktorer till en minskning på 520 kWh.

## 6.1 Begränsningarna i processen

Enligt tabell 2 i kapitel 4 är den minimala produktionsnivån för LC-kvarn 1 cirka sex ton per timme. Det motsvarar 20 % av den totala produktionen om produktionsnivån är 30 ton per timme. Utmaningen är att lövvedsmassan inte kan malas separat för pappersslag med en mindre lövvedshalt än nämnda 20 %. Detta i sin tur gör den separata malningen av lövvedsmassa omöjlig för dessa pappersslag. Produktionsnivån av pappersslag med ytvikten 60 gram per kvadratmeter ligger vid 22,5 ton per timme. Andelen lövvedsmassa i pappret måste överskrida 27 % för att LC-kvarnen 1 ska kunna användas i den separata malningen. De rekommenderade halterna lövvedsmassa i pappersslag med ytvikten 60 gram är i Jakobstad cirka 10–15 %. Emellertid är den reella lövvedshalten mellan noll och fyra % för de respektive pappersslagen. Det verkar inte realistiskt att en ändring i enbart malning skulle kunna förbättra fiberegenskaper på ett sätt som tillåter en sjufaldig ökning av lövvedshalten. Eftersom produktion av de respektive pappersslagen inte är möjligt med den nämnda apparaturen måste dessa pappersslag exkluderas från beräkningen av återbetalningstiden.

En likadan utmaning finns hos pappersslag med ytvikten 70 gram. Produktionsnivån för dessa pappersslag ligger vid 25,5 ton per timme. Användning av LC-kvarn 1 är möjligt då halten lövvedsmassa överskrider 25 %. I nuläget överskrider gränsen hos 27 % av den årliga produktionen av papper med ytvikten 70 gram. Cirka 54 % av pappersslag med den respektive ytvikten har som rekommendation en lövvedshalt på 25 %. Hos dessa pappersslag är den hittills reella halten cirka 18 %. Det är rimligt att anta att halten hos dessa pappersslag kan ökas till den rekommenderade då separat malning är i bruk. Lövvedsmassans andel i de kvarvarande pappersslagen med ytvikten 70 gram ligger långt under gränsvärdet 25 % och därmed kan de inte tas med i beräkningen av återbetalningstiden. Både pappersslag med ytvikten 60 gram och 70 gram med lövvedshalten under 25 % behandlas skilt i kommande kapitel under namnet tunna pappersslag.

Som tabell 2 visar är nettoeffekten av LC-kvarnen JC-01 endast 1000 kW. Det bör påpekas att nettoeffekten är en begränsande faktor då höga specifika energiförbrukningar önskas nås samtidigt med en hög produktionsvolym. Till exempel vid produktion av papper med ytvikten 120 gram med lövvedsmassahalten 50 % är den högsta tillgängliga specifika energiförbrukningen cirka 60 kWh/t.

## 6.2 Metoder

En Excel-baserad räknare utvecklades för användning i beräkningarna. Andelen lövvedsmassa före och efter utgör den andra primära delen av modellen. Priserna av olika massor kan lätt jämföras och till exempel kan björkvedsmassa ersättas med eukalyptusmassa. Räknaren tar i beaktande både HC- och LC-malningens inverkan och jämför elförbrukningen vid olika malningsenergier. LC-malningen har förut utförts vid produktion av kalandrerade pappersslag med endast en LC-kvarn. Räknaren tar i beaktande tomgångseffekten av LC-kvarnar som ökar då LC-kvarnen 1 tas i bruk vid sidan om den andra LC-kvarnen i den föreslagna malningskonfigurationen. Hos pappersslag med HC-malning kan det minskade behovet av HC-malning tillåta användning av endast en HC-kvarn i stället för två.

Till sist adderar räknaren ihop malningens och massafördelningens inverkan och den totala besparingspotentialen räknas ut. Skillnaden mellan de tidigare och de nya produktionskostnaderna utgör besparingen. Modeller för årliga malningskostnader och råmaterialskostnader av ett pappersslag före processändringen är följande:

$$A_0 = (HC_0 + LC_0) \cdot E \cdot P \cdot T$$

$$B_0 = (F_0 \cdot F_p + G_0 \cdot G_p) \cdot P \cdot T$$

$$C_0 = B_0 + A_0$$

där

$A_0$  är den årliga malningskostnaden i nuläget  $\left[\frac{\text{€}}{\text{år}}\right]$

$B_0$  är den årliga råmaterialkostnaden i nuläget  $\left[\frac{\text{€}}{\text{år}}\right]$

$C_0$  är den årliga produktionskostnaden i nuläget  $\left[\frac{\text{€}}{\text{år}}\right]$

$HC_0$  är den specifika energiförbrukningen för HC – kvarnar i nuläget  $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{t torr massa}}\right]$

$LC_0$  är den specifika energiförbrukningen för LC – kvarnar i nuläget  $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{t torr massa}}\right]$

$E$  är elpriset  $\left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}}\right]$

$F_0$  och  $G_0$  är löv – respektive barrhalten i massan i nuläget

$F_p$  är lövvedmassans pris  $\left[\frac{\text{€}}{\text{t torr massa}}\right]$

$G_p$  är barrvedmassans pris  $\left[\frac{\text{€}}{\text{t torr massa}}\right]$

$P$  är den årliga produktionen  $\left[\frac{\text{t}}{\text{år}}\right]$

$T$  är torrhalten

Modeller för malnings- respektive råmaterialkostnader i den planerade malningsprocessen är följande:

$$A_1 = (HC_1 + LC_1) \cdot G_1 + LC_{\text{löv}} \cdot F_1)) \cdot E \cdot P \cdot T + (LC_t - HC_t) \cdot E \cdot \frac{P}{P_t}$$

$$B_1 = (F_0 \cdot F_p + G_0 \cdot G_p) \cdot P \cdot T$$

$$C_1 = B_1 + A_1$$

där

$A_1$  är den årliga malningskostnaden efter den planerade processändringen  $\left[\frac{\text{€}}{\text{år}}\right]$

$B_1$  är den årliga råmaterialkostnaden efter den planerade processändringen  $\left[\frac{\text{€}}{\text{år}}\right]$

$C_1$  är den årliga produktionskostnaden efter den planerade processändringen  $[\frac{\text{€}}{\text{år}}]$

$HC_1$  är den specifika energiförbrukningen för HC

– kvarnar efter den planerade processändringen  $[\frac{\text{kWh}}{\text{t torr massa}}]$

$LC_1$  är den specifika energiförbrukningen för LC

– kvarnar efter den planerade processändringen  $[\frac{\text{kWh}}{\text{t torr massa}}]$

$LC_{\text{lov}}$  är den specifika energiförbrukningen för LC – kvarnen 1  $[\frac{\text{kWh}}{\text{t torr massa}}]$

$LC_t$  är tomgångseffekten för en till LC – kvarn [kW]

$HC_t$  är tomgångseffekten av en HC – kvarn och valspressen sammanlagt [kW]

$F_1$  och  $G_1$  är löv –

respektive barrhalten i massan efter den planerade processändringen

$P$  är den årliga produktionen  $[\frac{\text{t}}{\text{år}}]$

$P_t$  är produktionen per timme  $[\frac{\text{t}}{\text{h}}]$

$T$  är torrhalten

### 6.3 Parametrar

Den årliga produktionen av varje pappersslag beräknas med hjälp av antalet producerade metrar papper multiplicerad med bredden av längdskäraren och ytvikten av pappret. För ta i beaktande kantbander vid längdskäraren användes bredden på längdskäraren i beräkningen i stället för bredden av pappersmaskinen. Bredden på längdskäraren bestämmer hur stor del av pappersbanans bredd blir till slutprodukt. Den resterande delen av pappersbanan kallas kantband. Annat utskott som formats hos längdskäraren, omrullningsmaskinen eller lagret exkluderas från beräkningen.

Eftersom eftermalningskvarnar opereras på samma sätt både i nuläget och i den planerade processändringen behöver de inte beaktas. Även tillsatsämnen och utskott lämnas utanför

modellen för att förenkla beräkningen. Fukthalten i pappret är en viktig del att inkluderas eftersom vattnet är ett mycket billigare råmaterial än kemisk massa.

Priset för elektriciteten som används i beräkningen är medeltalet av spot-priset från 2022. Enligt omavoima.fi är det genomsnittliga priset under 2022 109,9 euro per MWh (Omavoima, 2022). Överföringspriset för storindustri med effektbehov över 2,5 MW var 25,2 euro per MWh under juni 2022 (Energiavirasto, 2022). Sammanlagt är kostnaden för elenergi 135,1 euro per MWh. Både priset för el och överföringsavgifterna har stigit under 2022. Den globala ekonomiska situationen tyder på att även vidare prisökningar kan förväntas.

Priset för lövveds- och barrvedsmassor hämtas från Norexeco. Priserna som används i beräkningarna baserar sig på Norexecos priser för olika kemiska massor den 22 juli 2022. Lövvedsmassans pris är 1 346 dollar per ton och barrvedsmassans pris 1 458 dollar per ton. Med samma dagens kurs mellan dollar och euro är priserna 1319 respektive 1429 euro. Skillnaden mellan priserna har minskat från 120 dollar per ton i januari 2022 till 111 dollar per ton i juli 2022. Importen av i synnerhet björkved har minskat och detta har lett till prisökning av lövvedsmassan.

Produktionsdata visar den reella halten lövvedsmassa i pappret. Den nominella halten som recepten rekommenderar fungerar som en bra utgångspunkt för beräkningen. Hos majoriteten av papperslagen avviker den reella lövvedshalten från den rekommenderade med 5–10 procentenheter vilket kan anses vara uppnåeligt med den optimerade malningen. Valet av användning av de rekommenderade halterna i beräkningen stöds av att kunderna har godkänt dessa lövvedshalter.

Som teorin i kapitel 4.3 visade kan SRE-värdet för barrvedsmassan multipliceras med en faktor bestående av förhållandet mellan den tidigare och den nya produktionsnivån hos LC-kvarnen som i fortsättningen endast mal barrvedsmassa. En övre gräns för SRE-värdet behövs för fall där SRE-värdet räknat med multipliceringen överskrider LC-kvarnens maximala effekt. Enligt Baker, 1995 är den föreslagna specifika energiförbrukningen för barrvedsmassa mellan 80 och 120 kWh per ton. Medeltalet av dessa värden är 100 kWh per ton vilket används som övre gräns för barrvedsmassans SRE-värde i beräkningen. Antalet LC-kvarnar som mal barrvedsmassa beror på nettoeffekten som behövs för att åstadkomma en specifik energiförbrukning på 100 kWh för barrvedsmassan. I vissa fall kan barrvedsmassan malas med endast en kvarn.

Lövvedsmassan behöver något mindre energi och de föreslagna värden ligger mellan 40 och 80 kWh per ton enligt Lumiainen, 2000. Medeltalet av dessa värden är 60 kWh per ton vilket används i beräkningen. SRE-värdet 60 kWh per ton är användbar även ur synvinkeln av effektbegränsningarna nämnda i kapitel 6.2. Nettoeffekten av LC-kvarnen 1 begränsar den specifika energiförbrukningen då både produktionsnivån och lövvedshalten samtidigt är höga. I sådana fall prioriteras lövvedshalten och produktionsnivån framom den specifika energiförbrukningen. Beräkningen görs med ett värde av malningsenergi så nära den önskade som möjligt.

## 6.4 Data

Tabell 4 innehåller produktionsdata av vita kalandrerade pappersslag från 2021. Pappersslag vars årliga produktion underskrider 80 ton per år har lämnats bort från tabellen eftersom deras inverkan är negligerbar. Även specialpapper vars recept inte tar ställning till användning av lövvedsmassa har lämnats utanför tabellen. För pappersslag utan nominell lövvedsmassahalt antogs att det optimala garnityret kan öka på lövvedsmassahalten med 5 procentenheter från den reella halten. För pappersslag där den nominella lövvedshalten var mellan 25 och 30 % användes det högre värdet i beräkningen. Pappersslagen i tabell 4 har nämnts med nummervärden mellan 1–25 av sekretesskäl.

*Tabell 4. Pappersslag med respektive ytvikter, verkliga lövvedshalter, nominella lövvedshalter, årsproduktioner, fukthalter, genomsnittliga SRE-värden vid LC-malning och genomsnittliga SRE-värden vid HC-malning.*

| Papper-<br>slag | Ytvikt<br>[g/m <sup>2</sup> ] | Reell<br>lövmassa-<br>halt [%] | Nominell<br>lövmassa-<br>halt [%] | Års-<br>produktion<br>[t/a] | Fukt-<br>halt<br>[%] | LC-<br>malnings-<br>energi<br>[kWh/t] | HC-<br>malnings-<br>energi<br>[kWh/t] |
|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1               | 120                           | 42                             | 50                                | 376                         | 7,2                  | 75                                    | 0                                     |
| 2               | 110                           | 36                             | 50                                | 267                         | 7,2                  | 61                                    | 0                                     |
| 3               | 100                           | 44                             | 50                                | 1683                        | 7,2                  | 67                                    | 0                                     |
| 4               | 90                            | 45                             | 50                                | 1327                        | 7,2                  | 61                                    | 0                                     |
| 5               | 80                            | 41                             | 50                                | 1476                        | 7,2                  | 74                                    | 0                                     |
| 6               | 70                            | 34                             | 39                                | 2122                        | 7,2                  | 72                                    | 0                                     |
| 7               | 90                            | 20                             | 25                                | 412                         | 7,2                  | 55                                    | 83                                    |
| 8               | 80                            | 21,5                           | 25                                | 275                         | 7,2                  | 59                                    | 83                                    |
| 9               | 100                           | 20                             | 25/30                             | 141                         | 7,2                  | 98                                    | 0                                     |
| 10              | 90                            | 19,3                           | 25/30                             | 539                         | 7,2                  | 76                                    | 0                                     |
| 11              | 80                            | 18,6                           | 25/30                             | 748                         | 7,2                  | 86                                    | 0                                     |
| 12              | 70                            | 17,6                           | 25/30                             | 438                         | 7,2                  | 98                                    | 0                                     |
| 13              | 110                           | 16                             | 25                                | 475                         | 7,2                  | 59                                    | 91                                    |
| 14              | 100                           | 18,7                           | 25                                | 743                         | 7,2                  | 58                                    | 98                                    |
| 15              | 95                            | 20                             | 25                                | 104                         | 7,2                  | 58                                    | 121                                   |
| 16              | 90                            | 20,3                           | 25                                | 7895                        | 7,2                  | 58                                    | 100                                   |
| 17              | 85                            | 20,4                           | 25                                | 991                         | 7,2                  | 55                                    | 81                                    |
| 18              | 80                            | 18,7                           | 25                                | 7020                        | 7,2                  | 56                                    | 83                                    |
| 19              | 75                            | 20                             | 25                                | 2347                        | 7,2                  | 58                                    | 87                                    |
| 20              | 70                            | 19,3                           | 25                                | 3810                        | 7,2                  | 58                                    | 89                                    |
| 21              | 100                           | 20,5                           | 25/30                             | 243                         | 5,2                  | 90                                    | 0                                     |
| 22              | 120                           | 21,7                           | 25/30                             | 1188                        | 7,2                  | 75                                    | 0                                     |
| 23              | 110                           | 21                             | 25/30                             | 539                         | 7,2                  | 74                                    | 0                                     |
| 24              | 100                           | 21                             | 25/30                             | 2324                        | 7,2                  | 72                                    | 0                                     |
| 25              | 90                            | 19,6                           | 25/30                             | 1286                        | 7,5                  | 69                                    | 0                                     |

Pappersslag vars produktionsnivå inte fyller kraven nämnda i kapitel 6.2 presenteras i tabell 5. Dessa pappersslag i sig själv bidrar inte till återbetalningstiden på något sätt i separat malning av lövvedsmassa. Besparingspotentialen som finns hos dessa pappersslag utreds dock som bakgrundsmaterial till framtida projekt. Den sammanlagda årsproduktionen för

pappersslag i tabell 5 är över 9 000 ton. Det är en fjärdedel av årsproduktionen av de pappersslagen som presenteras i tabell 4. Pappersslagen i tabell 5 har nämnts med nummervärden mellan 26–32 av sekretesskäl.

För pappersslag där den nominella lövvedshalten var mellan 10 och 15 % användes det högre värdet i beräkningen. Nämnvärt i data är att hos vissa pappersslag ligger den reella lövvedshalten redan i nuläget nära eller även ovanför den nominella lövvedshalten. Följaktligen begränsas besparingspotentialen hos dessa pappersslag. Marginalen mellan den reella lövvedshalten och den nominella lövvedshalten kan ökas för att öka på besparingspotentialen. Det kräver dock förhandlingar med kunder om papprets råmaterialssammansättning.

*Tabell 5. Pappersslag vars produktionsnivå är för låg för LC-kvarnen 1 med respektive ytvikter, verkliga lövvedshalter, nominella lövvedshalter, årsproduktioner, fukthalter, genomsnittliga SRE-värden vid LC-malning och genomsnittliga SRE-värden vid HC-malning.*

| Papper<br>-slag | Ytvikt<br>[g/m <sup>2</sup> ] | Reell<br>lövhalt<br>[%] | Nominell<br>lövhalt [%] | Års-<br>produktion<br>[t/a] | Fukt-<br>halt<br>[%] | LC-<br>malnings-<br>energi<br>[kWh/t] | HC-<br>malnings-<br>energi<br>[kWh/t] |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 26              | 60                            | 2,7                     | 10/15                   | 992                         | 5,2                  | 84                                    | 0                                     |
| 27              | 70                            | 15,6                    | 10/15                   | 129                         | 5,2                  | 93                                    | 0                                     |
| 28              | 80                            | 15                      | 10/15                   | 904                         | 5,2                  | 75                                    | 0                                     |
| 29              | 60                            | 3,9                     | 10                      | 3189                        | 7,2                  | 91                                    | 0                                     |
| 30              | 70                            | 14,3                    | 15                      | 800                         | 7,2                  | 88                                    | 0                                     |
| 31              | 80                            | 17,8                    | 15                      | 2655                        | 7,2                  | 75                                    | 0                                     |
| 32              | 70                            | 12,5                    | 25                      | 505                         | 7,2                  | 86                                    | 0                                     |

## 6.5 Kostnadsfaktorer

Pumpen hos lövvedsmassatornet använder i nuläget en växellåda i kraftöverföring mellan motorn och centrifugalpumpen. I den planerade processändringen byts pumpen till en pump som styrs med växelriktare. Bytet har planerats göras för att optimera trycket i massalinen genom en noggrannare kontroll av pumpen. Även en pump med kapaciteten 125 liter per sekund planeras anskaffas till utskottskypen 1. Orsaken är att den nuvarande pumpens



kapacitet inte räcker till vid stora produktionsnivåer. Investeringen i pumpar och deras installation utgör cirka 10 % av den planerade processändringens kostnader.

Rörledningarna inklusive klämmor, isoleringar och ställningar är den största enskilda kostnadsfaktorn i projektet. Med ventilerna medräknade utgör rörledningsarbetet cirka 35 % av den planerade processändringens kostnader. Kostnaden av rör har kraftigt ökat under åren 2021 och 2022.

Elektriska apparater såsom energicentraler och inverterare har planerats installeras med relaterad tråddisponering. Automationsapparatut inklusive fältsändarna och automatventiler behövs för de nya rörledningarna. Med installation av apparaturen och automationssystemet medräknat utgör el- och automationskostnader cirka 25 % av den planerade processändringens kostnader. Resterande kostnader består av planeringsarbete, underbyggnader, ändringsarbetet av cisternen och reservdelar. Investeringens kostnad för projektet i sin helhet är cirka 800k€.

## 7 Resultat och diskussion

### 7.1 Återbetalningstiden för separat malning av lövvedsmassa

Tabell 6 visar besparingspotentialen för varje pappersslag. Ordningen på pappersslagen är den samma som i tabell 4.

*Tabell 6. Besparing i massakostnader, besparing i malningskostnader och den totala besparingen.*

| Papperslag | Besparing i massa [k€/a] | Besparing i malning [k€/a] | Total besparing [k€/a] |
|------------|--------------------------|----------------------------|------------------------|
| 1          | 3,1                      | -0,5                       | 2,6                    |
| 2          | 3,8                      | -0,7                       | 3,1                    |
| 3          | 10,3                     | -3,6                       | 6,7                    |
| 4          | 6,8                      | -3,7                       | 3,1                    |
| 5          | 13,6                     | -2,1                       | 11,5                   |
| 6          | 10,8                     | -4,8                       | 6,0                    |
| 7          | 2,1                      | 0,3                        | 2,4                    |
| 8          | 1,0                      | 0                          | 1,0                    |
| 9          | 1,4                      | 0,1                        | 1,5                    |
| 10         | 5,9                      | -1,1                       | 4,8                    |
| 11         | 8,7                      | -0,8                       | 7,9                    |
| 12         | 5,5                      | 0                          | 5,5                    |
| 13         | 4,4                      | 0,4                        | 4,8                    |
| 14         | 4,8                      | 0,8                        | 5,6                    |
| 15         | 0,5                      | 0,1                        | 0,6                    |
| 16         | 37,9                     | 9,1                        | 47                     |
| 17         | 4,6                      | -0,2                       | 4,4                    |
| 18         | 45,1                     | -1,3                       | 43,8                   |
| 19         | 12,0                     | 1,9                        | 13,9                   |
| 20         | 22,2                     | -0,5                       | 21,7                   |
| 21         | 2,4                      | -0,1                       | 2,3                    |
| 22         | 10,1                     | -2,5                       | 7,6                    |

|            |      |       |       |
|------------|------|-------|-------|
| 23         | 5,0  | -1,2  | 3,8   |
| 24         | 21,4 | -5,7  | 15,7  |
| 25         | 13,6 | -3,5  | 10,1  |
| Sammanlagt | 257  | -19,6 | 237,4 |

Den årliga besparingen då malningsenergierna är ställda enligt teorin av Lumiainen, 2000 är 237k€. Projektet i sin helhet har en estimerad kostnad på 800k€ vilket ger en återbetalningstid på 3,4 år.

Beräkningen visar att malningsenergierna enligt Lumiainens rekommendation orsakar en ökning i elkostnader. Den totala ökningen är i skala 20k€ årligen. Följaktligen är prisskillnaden mellan de två massorna den enda faktorn som bidrar till besparingar. Eftersom malningskostnaderna beror direkt på elpriset kan de ökade elpriserna förlänga återbetalningstiden. Även i det fall att ett elpris på 500 euro per MWh antas är den årliga ökningen av elkostnader cirka 30k€. Jämförelsen visar att elprisets inverkan på återbetalningstiden är negligerbar.

I och med att det enbart är råmaterialfördelningen i pappret som ger besparingar är det nödvändigt att granska hur mycket man kan överskrida den nominella lövvedshalten i pappret. Beräkningen ovan baserar sig på dessa nominella halter som i fall av vissa pappersslag med stora produktionsvolymerna inte avviker från de reella halterna mera än cirka fem procentenheter. Pappersslag vars årsproduktion är mellan sju och åtta tusen ton årligen utgör redan nu cirka 40 % av den totala euromässiga besparingspotentialen. En vidare ökning av lövvedshalten med fem procentenheter på alla pappersslag ökar den absoluta besparingen från 237k€ till 441k€ årligen. En provkörningsplan som undersöker möjligheterna till ökning av lövvedshalten presenteras i bilaga 1.

En annan aspekt som stöder prioriteringen av de volymmässigt stora papperslagen är förhållandet mellan partiets första maskinrullor till produktionsvolymen. Produktionen i Jakobstad sker i perioder där till exempel vitt kalandrerat papper med ytvikten 90 gram produceras några gånger per månad. Den första maskinrullen produceras ofta med en lägre lövvedshalt än den nominella för att säkerställa att kvalitetskraven gällande styrka och optiska egenskaper uppnås. Denna osäkerhet härstammar från tidsberoende variationer i

massans kvalitet. Först efter en laboratorieanalys av pappret kan operatörerna vara säkra att kvalitén styrkemässigt tillåter en ökning av lövvedshalten i pappret. Hos pappersslag med hög produktionsvolym är andelen maskinrullor med optimerad lövvedshalt högre på grund av längre produktionsperioder.

## 7.2 Besparingspotentialen hos tunna papperslag

Begränsningarna nämnda i kapitel 6.2 orsakar att det årligen produceras cirka 9 200 ton kalandrerat papper vars råmaterial inte är separat mald. Metodiken som används för att bestämma besparingspotentialen hos dessa pappersslag är den samma som användes i kapitel 6. Ordningen på pappersslagen i tabell 7 är den samma som i tabell 5.

*Tabell 7. Besparing i massakostnader, besparing i malningskostnader och den totala besparingen.*

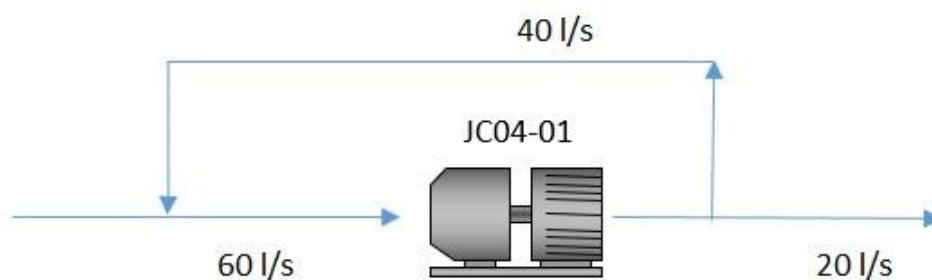
| Papperslag | Besparing<br>i massa<br>[k€/a] | Besparing<br>i malning<br>[k€/a] | Total<br>besparing<br>[k€/a] |
|------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 26         | 10,8                           | -1,0                             | 9,7                          |
| 27         | 12,7                           | -2,0                             | 10,7                         |
| 28         | 4,7                            | -1,9                             | 2,8                          |
| 29         | 19,9                           | -5,0                             | 14,9                         |
| 30         | 4,7                            | -1,1                             | 3,6                          |
| 31         | 6,0                            | -5,6                             | 0,4                          |
| 32         | 6,4                            | -0,7                             | 5,7                          |
| Sammanlagt | 65,2                           | -17,3                            | 47,8                         |

Beräkningen visar att om malningen kunde utföras enligt Lumiaïens, 2000 rekommendationer för specifika energiförbrukningar för lövveds- och barrvedsmassor vore den årliga besparingen kring 48k€. Detta utifrån antagandet att lövvedshalten i pappret uppfyller den nominella halten som anges i respektive recept. Ökning av halten från den nominella ökar på besparingen stort som det visade sig i kapitel 7.1. En ökning av fem

procentenheter av lövvedshalten för varje pappersslag ger en årlig besparing på 95k€. De reella lövvedshalterna för tunna pappersslag, som nämnt i kapitel 6.4, tyder på att en ökning av lövvedshalten med fem procentenheter är realistisk. På grund av den högre andelen lövvedsmassa i pappret kan även de optiska egenskaperna förväntas vara bättre.

Begränsningen som presenteras i kapitel 6.2 tyder på att vissa tunna pappersslag inte kan produceras på ett sätt som utnyttjar den nya apparaturen. Besparingspotentialen som tunna pappersslag uppvisar ger upphov till investeringar som möjliggör användning av LC-kvarnen 1 i malning av lövvedsmassa i produktionen av dessa pappersslag.

En möjlig lösning ligger i extern återcirkulation av massan efter LC-kvarnen. Sandberg och Berg, 2005 utförde en forskning med extern återcirkulation av massa till en LC-kvarn. Funktionsprincipen för extern återcirkulation illustreras i figur 21. Forskarna kom fram till att extern återcirkulation kan användas för att stöda en stabil operation av LC-kvarnen utan att massans egenskaper stort påverkas.

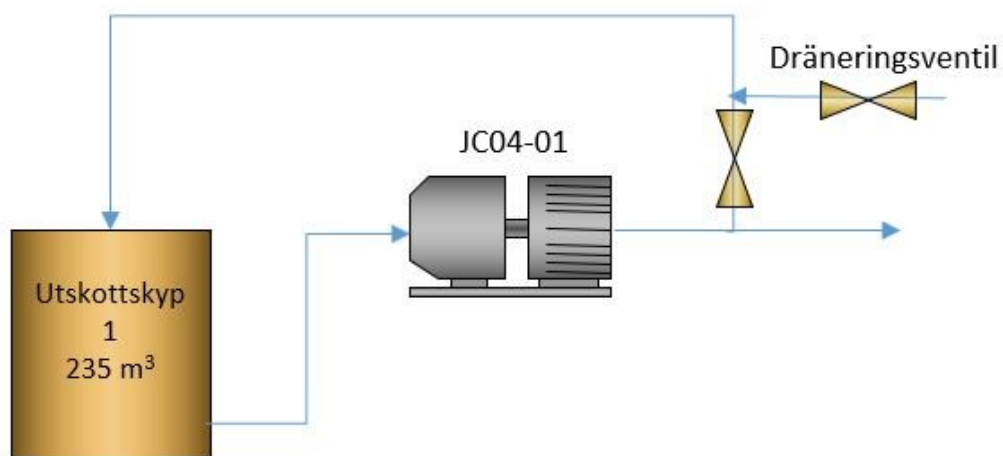


Figur 21. Funktionsprincipen för shuntkoppling i malning av massa.

Uppfattningen för en studie av Sandberg och Berg, 2005 var att malningsresultatet kunde bli icke-homogent. Det visade sig dock inte uppkomma några stora skillnader i malningsresultatets homogenitet mellan återcirkulerad massa och referensprovet. Forskarna föreslår att den externa återcirkulationen minskar på den i LC-kvarnen naturligt förekommande interna återcirkulationen. Dessa två fenomen tänks balansera varandra. Forskarna poängterar att den externa återcirkulationens inverkan på papprets optiska egenskaper och tryckegenskaper inte kan bestämmas på basen av denna forskning utan vidare experiment behövs.

Diskussioner om ämnet med produktionsingenjörer ledde till ett praktiskt påpekande: eftersom kvarnen körs i den pumpande riktningen måste trycket på utgående massan sänkas före den återcirkuleras in i kvarnen. Annars finns det risk för att massans tryck överskrider trycket på tätningsvattnet. I en lindrigare scenario överskrider den nedre gränsen för tryckskillnaden mellan utgående massa och tätningsvattnet och kvarnen stannar. Kvarnen kan aldrig startas om direkt utan elmotorn behöver vänta en stund före ett nytt startförsök görs. Detta är för att skydda apparaturen från frekventa stora strömmar. En kvarn ur funktion mal inte massan men massflödet löper genom kvarnen till processen. Bristfälligt mald eller omald massa försämrar papperskvaliteten signifikant.

En föreslagen lösning till problemet med oönskad tryckökning i återcirkulerad massa är att leda återcirkulationsströmmen tillbaka till utskottskyp 1 där trycket balanseras. Eftersom kvarnen i sig fungerar som en pump behövs det ingen dyr apparatur för att kunna leda massan till utskottskypen. Endast en rörledning med en automatventil och en dräneringsventil behövs. Det föreslagna systemet illustreras i figur 22.



Figur 22. Det föreslagna systemet för extern återcirkulation av lövvedsmassa.

### 7.3 Osäkerhetsfaktorer

Den centrala idén bakom separat malning av lövvedsmassa är att utnyttja prisskillnaden mellan lövvedsmassan och barrvedsmassan. Prisskillnaden som används i beräkningen är 110

€ per ton. I januari 2016 var prisskillnaden endast 14 dollar per ton (Norexeco, 2022). Återbetalningstiden med den i januari 2016 rådande prisskillnaden mellan massor är 85 år. Å andra sidan kan lövvedsmassans pris sjunka i förhållande till barrvedsmassan: i juli 2021 var prisskillnaden 196 dollar per ton (Norexeco, 2022). Återbetalningstiden med sådana massapriser är under två år. Om den planerade processändringen kan tänkas öka på lövvedshalten hos alla vita kalandrerade papperslag med fem procentenheter blir återbetalningstiden elva månader.

Kvalitén på den inkommande massan varierar. Variationer beror på vedkvalitén, kokförhållanden och tvätten av massan. Även halten smuts i massan varierar. Ibland kan tillgängligheten på lövvedsmassan vara dålig och kalandrerade papper körs helt utan lövvedsmassa. Dessa faktorer kan inte helt kontrolleras eftersom Jakobstads fabrik är en integrerad fabrik där en extern aktör svarar för massaproduktionen. Variationer i massans kvalitet leder till att andelen lövvedsmassa i pappret måste minskas. Endera görs minskningen på grund av bristande styrke- eller optiska egenskaper. Om halten lövvedsmassa i pappret minskas till nivån som användes innan processändringen blir det ingen ekonomisk nytta av den nya apparaturen.

Årsproduktionen av vitt kalandrerat papper var 2021 cirka 40 000 ton vilket motsvarar 20 % av brukets kapacitet. Årsproduktionen kan i fortsättningen vara betydligt mindre om brukets produktportfölj ändras. Produktportföljen följer kundernas behov och ändras enligt läget på marknaden. Konsumtionen av finpapper minskar globalt medan behovet av förpackningspapper och säckpapper ökar. Kraven på styrkeegenskaper hos till exempel förpackningspapper och säckpapper är högre än kraven hos finpapper vilket betyder att lövvedsmassan inte kan användas som råvara i produktionen av de först nämnda papperslagen. En annan global trend är en ökad efterfrågan på brunt papper. Produktionen av brunt papper oberoende av papperslag görs i Jakobstad enbart med barrvedsmassa eftersom det integrerade cellulosabruket inte producerar brun lövvedsmassa.

Analysen i kapitel 6 grundar sig på nominella SRE-värden som författare har givit för separat malning av löv- och barrvedsmassor. Det har visat sig att resultat från prov i laboratorieskala inte direkt kan förväntas realiseras då malningen utförs i industriskala. Dessutom är pappersmaskiner olika och olikheter på virapartiet, presspartiet och torkpartiet förändrar slutproduktens egenskaper även om massan är den samma. Provkörningar med olika

specifika malningsenergier för båda fibertyper behövs för att kunna göra en mera noggrann analys om optimala malningsparametrar. Provkörningsplanen presenteras i bilaga 1.

## 8 Slutsatser

Detta diplomarbete studerade hurdan inverkan en ändring på råmaterialsammansättningen har på produktionskostnaderna av vitt kalenderat papper. En ändring i råmaterialsammansättningen tillåts av separat malning av massorna. Lövvedsmassan, som är den billigare råmaterialen, måste behandlas på ett sätt som utvecklar styrkeegenskaperna av fibrerna. Återbetalningstiden för en processändring som möjliggör separat malning är 3,4 år. Det visade sig i känslighetsanalysen att återbetalningstiden är starkt knuten till prisskillnaden mellan de två massorna. Beräkningarna gjordes under antagandet att skillnaden mellan massapriserna är lika hög som den var under sommaren 2022. Eftersom prisskillnaden kan sjunka kan återbetalningstiden förlängas med tiotals år. Därmed är investeringen inte lönsam. Elpriset anses ha en negligerbar inverkan på återbetalningstiden.

Produktionsdata från år 2021 visade att det finns behov av optimering av råmaterialsammansättningen hos en stor del av pappersslagen. Kapaciteten av LC-kvarnen 1 begränsar pappersslagen som kan produceras med separat malning. En ökning i lövvedsmassahalten som kan utföras med den nuvarande apparaturen har en positiv inverkan på produktionskostnader. Följaktligen är det viktigt att samla in data för att kunna optimera effektiviteten av de malkvarn som används idag.



## 9 REFERENSER

- Andritz Disc-Refiner. (2022). Andritz. Hämtad 12 maj 2022, från <https://www.andritz.com/panelboard-en>.
- Aurell, R. (1963) Några jämförande synpunkter på sulfatkokning av tall- och björkved. *Svensk Papperstidn.* 66: 978–989.
- Baker, C. F. (1995). Good practice for refining the types of fiber found in modern paper furnishes. *Tappi Journal*, 78(2), 147–153.
- Canfor. (2010). Pulp Refining Seminar Part II. Canada
- Domec, J. C., & Gartner, B. L. (2002). How do water transport and water storage differ in coniferous earlywood and latewood? *Journal of Experimental Botany*, 53(379), 2369-2379.
- Ek, M., Gellerstedt, G., & Henriksson, G. (2009). Pulp and paper chemistry and technology (Volume 2). *Pulping Chemistry and Wood Biotechnology*, 91–149.
- Energiavirasto. (2022). Sähköhintatilastot. Energiavirasto.fi. Hämtad den 27 juli 2022, från <https://energiavirasto.fi/sahkon-hintatilastot>.
- Erken, M. (2014). *Exportindustrins behov av tillförlitliga leveranser*. Scandfibre. Hämtad den 23 april 2022, från <https://slideplayer.com/slide/2314322/>
- Forslund, A. (2020). Refiner Energy Optimization Utilizing Fiber Analyzer.
- Gharehkhani, S., Sadeghinezhad, E., Kazi, S. N., Yarmand, H., Badarudin, A., Safaei, M. R., & Zubir, M. N. M. (2015). Basic effects of pulp refining on fiber properties—A review. *Carbohydrate polymers*, 115, 785-803.

- Gullichsen, J., Fogelholm, C. J., & Fapet, O. (2000). *Chemical Pulping*. Papermaking Science and Technology. *Book 6B*.
- Haavisto, S., Koskenhely, K., & Paulapuro, H. (2008). Effect of fiber flocculation and filling design on refiner loadability and refining characteristics. *BioResources*, 3(2), 403–424
- Hartman, R. R. (1984). Mechanical treatment of pulp fibers for property development (Vol. Doctor of philosophy). Appleton, Wisconsin: Institute of Paper Chemistry, Lawrence University.
- Kang, T. (2007). *Role of external fibrillation in pulp and paper properties*. Helsinki University of Technology.
- Koskenhely K, Nieminen K. & Paulapuro H. (2007) Edge form profile of refiner filling bars and its impact on softwood fibre shortening, *Paperi ja Puu – Paper and Timber*, 89(4), s. 236 – 241.
- Lumiainen, J. (2000). Refining of chemical pulp. *Papermaking part, 1*, 86-122.
- Lundin, T. (2008). *Tailoring pulp fibre properties in low consistency refining*. Åbo Akademi.
- Miletzky, A., Punz, M., Weber, H., Wollboldt, P., Krasser, R., Bauer, W., & Schennach, R. (2013). Improvement of paper strength by increasing the xylan content. *Advances in pulp and paper research, Cambridge*, 887-906.
- NOREXECO. (2022). *Market data – graphs & data*. Norexeco.com. Hämtad den 23 april 2022, från <https://norexeco.com/market-data-graphs/#1603616979841-d131d9ff-f56c>.
- Nugroho, D. D. P. (2012). Low consistency refining of mixtures of softwood & hardwood bleached kraft pulp: effects of refining power. *Asian Institute of Technology*.

- Omavoima. (2022). Pörssisähkön eli spot-sähkön hinta kuukausittain. Omavoima.fi.  
Hämtad den 27 juli 2022, från <https://omavoima.fi/spot-sahkon-hintahistoria>.
- Paavilainen, L. (1993). Conformability, flexibility, and collapsibility of sulphate pulp fibres. *Paperi Ja Puu*, 75(9–10), 689–702
- Page, D. H. (1989). The beating of chemical pulps—the action and the effects. *Fundamentals of papermaking*, 1, 1-38.
- Paulapuro, H. (2000). Book 8: Papermaking part 1: stock preparation and wet end. *Helsinki [etc.]: Fapet Oy [etc.]*.
- Sandberg, C., & Berg, J. E. (2015). Effect of flow recirculation on pulp quality and energy efficiency in low consistency refining of mechanical pulp. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 30(2), 230-233.
- Sjöberg, J. C., & Höglund, H. (2005). *Refining systems for sack paper pulp: Part I HC refining under pressurised conditions and subsequent LC refining*. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 20(3), 320–328.

## 10 Bilaga 1

Besparingspotentialen av investeringen visar sig enligt kapitel 7.1 bestå till 100 % av prisskillnaden mellan lövvedsmassa och barrvedsmassa. Därmed är det ytterst viktigt att bestämma till vilken mån denna prisskillnad kan utnyttjas. Ur producentens synvinkel begränsas ökningen av lövvedshalten endast av körbarheten på pappersmaskinen och processapparaturens kapacitet så länge som papprets egenskaper är på en tillfredsställande nivå. Å andra sidan måste den ändrade råmaterialkompositionen i pappret godkännas av kunden. Före ett förslag om den nya råmaterialkompositionen presenteras till kunden för att börja förhandlingarna måste det säkerställas att pappersmaskinen kan producera papper av hög kvalitet med den ökade lövvedsmassahalten.

Målet i provkörningen är att hitta den optimala andelen lövvedsmassa som kan användas i produktionen för att minska på råmaterialkostnader. Även den specifika energiförbrukningen för separat malning av lövvedsmassa utreds i provkörningen. I och med att barrvedsmassa i fortsättningen mals ensam måste även dess specifika energiförbrukning bestämmas. Statistiska analyser används för att avgöra hur både styrkeegenskaper och optiska egenskaper utvecklas då malningsenergi och råmaterials fördelningen varierar.

Som tabell 3 i kapitel 6.4 visar utgör pappersslag av ytvikten 80 och 90 gram en stor andel av besparingarna. Därav följer att optimering av produktionsmetoderna för dessa pappersslag måste prioriteras. Stora produktionsvolymerna innebär långa produktionsperioder av respektive pappersslag vilket möjliggör goda förhållanden för provkörningar. Kvaliteten på den inkommande massan varierar tidsmässigt vilket ökar osäkerhetsnivån och för att minimera påverkan av dessa variationer är det ytterst viktigt att utföra provkörningar under en hel produktionsperiod.

För att resultaten från olika mätpunkter kan jämföras realistiskt önskas processparametrarna bibehållas konstanta under provkörningen. Dosering av lim, stärkelse, kaolin och utskott ska hållas stabila. Utskottet innehållande varierande halter av nämnda kemikalier är en källa för osäkerhet. Även pH och produktionsnivån borde under provkörningen behållas så nära konstanta som möjligt.

Det automatiska laboratoriet mäter både optiska och styrkeegenskaper. Resultaten samt medelvärden av vissa processparametrar sparas i en databas för varje producerad maskinrulle. Med endast några klickar kan man nå data upp till sju år bakåt innehållande till

exempel malningsenergies, malkvarnars effekter, kemikalieinsatser och produktionsnivån. Därmed är det enkelt att samla responsdata för provkörningsplanen.

Malningsgraden mäts med en online-mätare. Mätaren har en mätpunkt som tillåter bestämmandet av Schopper-Riegler efter malningen. För att kunna jämföra malningsgraden före och efter måste prov av den inkommande massan tas för hand från tömningsventilen i massalinjen.

Diskussioner med produktionsledningen samt beräkningarna av återbetalningstiden har visat att de viktigaste variablerna är den specifika energiförbrukningen av både lövvedsmassa och barrvedsmassa samt andelen lövvedsmassa. Enligt Lumiainen, 2000 ligger den specifika energiförbrukningen av lövvedsmassa vid separat malning mellan 40 och 80 kWh/t. För de valda pappersslagen tillåter nettoeffekten av LC-kvarnen 1 dessa SRE-värden. För separat mald barrvedsmassa rekommenderar Lumiainen, 2000 en specifik energiförbrukning på 60–200 kWh/t. Erfarenhet och data om tidigare produktion tyder på att värden mellan 60 och 120 kWh/t är rimliga för pappersslag med ytvikten 80–90 gram.

Halten lövvedsmassa har hittills varit mellan 19–20 % hos de pappersslagen som undersöks i provkörningen. Data i tabellen 3 i kapitel 4 visar att halten som recepten rekommenderar är 25%. Det bestämdes i diskussioner med produktions- och kvalitetsingenjörer att halten kan i provkörningen ökas ända upp till 30 %. Därmed används lövvedshalter mellan 20 och 30 % i provkörningen. Barrvedshalten varierar med lövvedshalten och får således värden mellan 70 och 80 %.

En ökning av halten kortfibrig lövvedsmassa kan förväntas försämra styrkeegenskaperna. Varje pappersslag har fördefinierade målvärden, varningsgränser samt gränser för underkännande. Naturligtvis får inte gränsen för underkännande underskridas. Styrkeegenskaperna kan anses vara tillfredsställande då de ligger ovanför varningsgränsen med en säker marginal. Besparingen kan inte göras på bekostnad av kvalitén.

Recepten i företagets databas utlistar följande styrkeegenskaper som de mest kritiska för kalandrerade vita pappersslag: dragstyrkan och rivstyrkan i både maskin- och tvärriktningar. Därmed används dessa även som responsvärden i analysen av provkörningens resultat. Tanken med provkörningen är att den ger riktlinjer till produktion även av andra pappersslag vilket motiverar användningen av dragindex och rivstyrkeindex som responsvärden i stället för absoluta värden. Problemet med mätning av pappersstyrkan i maskinriktningen och

tvärriktningen skilt är att maskinparametrarna orsakar varians i distributionen av styrkan mellan de två riktningarna. Följaktligen är det osäkert om ändringen i responsvärden beror på ändringarna gjorda enligt provkörningsplanen eller på maskinparametrarna. Ett geometriskt medeltal av styrkeindexen i maskinriktningen och tvärriktningen för respektive egenskaper beskriver utvecklingen på ett tillförlitligt sätt.

Med tanke på användningsområdet av kalandrerat papper är till exempel inte luftpermeansen en lika viktig egenskap som hos säckpapper. Därför används luftpermeansen inte som responsvärde. Eftersom största delen av kalandrerat papper vidareförädlas med till exempel beläggning eller tryckning är de optiska egenskaperna viktiga att prioritera.

Lövvedsmassan, som nämndes i kapitel 4, kan förväntas förbättra papprets optiska egenskaper då dess halt i pappret ökas. Följaktligen kan man förvänta att målvärden för optiska egenskaper överskrids och papperskvalitén uppgraderas. Följande egenskaper listas ut av recepten som de kritiska: slätheten, renheten och formationen. Dessa tre används som responsvärden i analysen av resultat av provkörningen. Erfarenheten har visat att lövvedsmassan innehåller flera orenheter än barrvedsmassan. Därmedelst är renheten en riskfaktor som uppföljas noggrant.

Användning av DSD-planen (*Definitive Screening Design*) motiveras med att all indata i provkörningen är kontinuerligt och variablerna är oberoende av varandra enligt kapitel 6. Antalet sampel begränsas av produktionsperiodens längd vilket betyder att antalet maskinrullor bör helst ligga nära tio. Provkörningsplanen enligt DSD-principen presenteras i tabell 7.

*Tabell 7. Provkörningsplanen med SRE-värden för lövvedsmassa och barrvedsmassa samt lövvedshalten.*

| Maskinrulle | SRE för lövvedsmassa<br>[kWh/t] | SRE för barrvedsmassa<br>[kWh/t] | Lövvedshalten<br>[%] |
|-------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| 1           | 80                              | 100                              | 25                   |
| 2           | 60                              | 100                              | 30                   |
| 3           | 80                              | 60                               | 30                   |
| 4           | 80                              | 80                               | 30                   |
| 5           | 80                              | 60                               | 20                   |
| 6           | 40                              | 60                               | 30                   |
| 7           | 80                              | 100                              | 20                   |
| 8           | 60                              | 80                               | 25                   |
| 9           | 40                              | 100                              | 30                   |
| 10          | 40                              | 100                              | 20                   |
| 11          | 40                              | 60                               | 25                   |
| 12          | 40                              | 80                               | 20                   |
| 13          | 60                              | 60                               | 20                   |