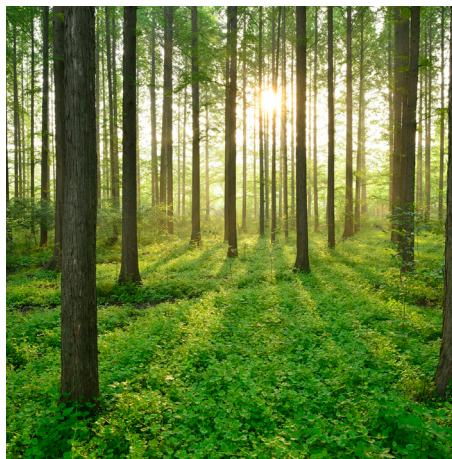


CCU FÖR INTERN CO₂-ANVÄNDNING I ETT MODERNT MASSABRUK

RAPPORT 2025:1147



SKOGSINDUSTRIELLA
PROGRAMMET



CCU för intern CO₂-användning i ett modernt massabruk

MARTA BIALIK, ERIK KARLSSON, NESTOR SALVADOR PALACIOS, ROLF LINDSTRÖM

ISBN 978-91-89918-54-2 | © Energiforsk december 2025

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Att minska både fossila och biogena koldioxidutsläpp är allt viktigare i kampen mot klimatförändringarna. Sulfatmassabruk, med sina stora och koncentrerade utsläpp av biogent koldioxid kan spela en viktig roll för koldioxidinfångning. Det finns också flera tekniker där koldioxid kan användas för att förbättra brukets prestanda. Syftet med det här projektet har varit att utvärdera tekniska möjligheter och ekonomiska fördelar med att använda brukets egen infångade biogena koldioxid i interna processer.

Marta Bialik, Erik Karlsson, Nestor Salvador Palacios och Rolf Lindström på RISE har bedömt potentialen till koldioxidinfångning i massabruket där prio ett har varit mesaugn, beroende på mängden tillgänglig koldioxid, och därefter sodapannan. En genomgång av tillgängliga processer för småskalig koldioxidinfångning har genomförts och en utvärdering av de interna behoven av koldioxid i massabruket där krav som mängder, renhet, temperatur osv, har tagits i beaktan. I rapporten redovisas ett antal småskaliga (10–300 kton CO₂ per år) tekniker för koldioxidinfångning lämpliga för rökgaserna från massabrukets mesaugn. Ett antal interna processer presenteras där användning av koldioxid kan leda till förbättrad prestanda, minskad kemikalieförbrukning och lägre miljöpåverkan (talloljekokeriet, brunmassatvätt, blekning nära neutrala förhållande, neutralisering och asklakning) eller till nya produkter (ligninfällning, grönlutsstrippning eller elektrobränsletillverkning).

Marie Kofod-Hansen

Programansvarig Skogsindustriella programmet

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Att minska både fossila och biogena CO₂-utsläpp har blivit allt viktigare i kampen mot klimatförändringarna. Sulfatmassabruk, med sina stora och koncentrerade utsläpp av biogent CO₂, har identifierats som särskilt lämpliga kandidater för koldioxidinfångning. Det finns dessutom ett antal tekniker där CO₂ kan användas för att förbättra brukets prestanda. Syftet med projektet var därför att utvärdera tekniska möjligheter och ekonomiska fördelar med att använda brukets egen infångade biogena CO₂ i interna processer.

Sodapannan är den största källan till biogen CO₂ på bruket, med ett typiskt specifikt utsläpp på 1930 kg CO₂/ADt, men att fånga utsläppen från mesaugnens (ca 340 kg CO₂/ADt) är fördelaktigare då CO₂-koncentrationen i avgaserna är högre. Infångad CO₂ kan användas i flera befintliga processer: talloljekokeriet, brunmassatvätt, blekning nära neutrala förhållande, neutralisering och asklakning - med bättre prestanda, minskad kemikalieförbrukning, förbättrad kemikaliebalans och lägre miljöpåverkan som följd. I ett antal applikationer, såsom ligninfällning, grönlutsstrippning eller elektrobränsletillverkning kan CO₂ användning bidra till nya produkter från massabruket. Ett exempel på systemeffekter av CO₂-användning i talloljetillverkning, där CO₂ delvis ersätter svavelsyra, har tagits fram med hjälp av massbalanssimulering. Resultaten visar att svavelöverskottet och därmed behovet av att stöta ut ESP-stoft minskar, vilket ger tydliga besparingar i form av minskade natriumförluster och lägre behov av make-up-kemikalier, men kräver att bruket hanterar ökade halter av kalium och klorid i processen.

En genomgång av tillgängliga infångningstekniker, särskilt de lämpliga för mesaugnens specifika CO₂-flöde samt en analys av interna behov av CO₂ med fokus på mängden har också gjorts. Resultaten visar att den största investeringen och osäkerheten ligger i själva insamlingen av CO₂, medan användningen ofta är enkel att integrera i befintliga processer. Småskalig aminabsorption och membranseparering är troligen de mest relevanta teknikerna för CO₂-infångning i det studerade fallet. Amintekniken är väletablerad, passar bra för mesaugnens rökgaser och det finns kompakta, skalbara lösningar tillgängliga, medan membraner är modulära, skalbara och flexibla m.a.p. kapacitet och renhet. Det sammanlagda CO₂-behovet för de undersökta processerna låg runt 30–75 kg CO₂/ADt, vilket är mindre än 30% av mesaugnens totala utsläpp. Två olika tillvägagångssätt kan därför rekommenderas: en liten, just-in-time-infångning med enklare rening och lagring för intern användning, eller en fullskalig infångning med rening, förvätskning och lagring, där mindre mängd CO₂ används internt medan resten kan exporteras. I en kompromisslösning kan bruket börja med ett litet och enkelt system med lämna dörren öppen för framtida expansion till större volym, renhet om möjligheter till förvätskning och export.

Nyckelord

CCU (Carbon Capture and Utilisation), koldioxidinfångning, intern CO₂-användning, sulfatmassabruk, aminabsorption, membranseparering, talloljekokeri, ligninutfällning, asklakning, grönlutsstrippning, kemikaliebalans

Summary

Reducing both fossil and biogenic CO₂ emissions has become increasingly important as a means to combat global climate change. Kraft pulp mills, with their large and concentrated biogenic emissions, have been identified as particularly suitable candidates for carbon capture. Moreover, there are several process stages where CO₂ can be used to improve the mill's performance. The aim of the project was therefore to evaluate the technical possibilities and economic benefits of using the mill's own captured CO₂ in internal processes.

The recovery boiler is the largest source of biogenic CO₂ at the mill, with a typical specific emission of 1930 kg CO₂/ADt; capturing the emissions from the lime kiln (about 340 kg CO₂/ADt) is nevertheless more advantageous as the CO₂ concentration in the flue gases is higher. Captured CO₂ can be used in several existing processes: tall oil plant, brownstock wash, near-neutral bleaching, neutralisation and ash leaching, resulting in better performance, reduced chemical consumption, improved chemical balance and lower environmental impact. In other applications, such as lignin precipitation, green liquor stripping or e-fuel production, CO₂ use can give new products from the pulp mill. An example of systemic effects of CO₂ use in tall oil production, where CO₂ partially replaces sulphuric acid, has been demonstrated using mass balance simulation. The results show that the sulphur surplus and, consequently, the need to purge ESP dust decreases, resulting in decreased sodium losses, lower makeup needs and clear economic savings – however, to a price of increased levels of potassium and chloride in the recovery cycle that the mill needs to handle.

A review of available capture techniques, especially those suitable for the specific CO₂ flow from the lime kiln, as well as an analysis of internal CO₂ needs with a focus on the specific amounts, have also been made. The results show that the greatest investment and uncertainty lie in the actual capture of CO₂, while its use is often easy to integrate into existing processes. Small-scale amine absorption and membrane separation are probably the most relevant techniques for CO₂ capture in the investigated case. Amine technology is well established, well suited to lime kiln flue gases and available as compact, scalable solutions, while membranes are modular, scalable and flexible in terms of capacity and product purity. The total CO₂ amount required for the investigated processes was around 30–75 kg CO₂/ADt, which is less than 30% of the lime kiln's total emissions. Two different approaches can therefore be recommended: either a small, just-in-time capture with simple purification and storage for internal use, or a full-scale capture with purification, liquefaction and storage, where some CO₂ is used internally while the rest can be exported or sold as a product. As a compromise solution, the mill can start with a small and simple system that allows for future expansion to larger volumes, purity and opportunities for liquefaction and export.

Keywords

CCU (Carbon Capture and Utilisation), internal CO₂ use, kraft pulp mill, amine absorption, membrane separation, tall oil plant, lignin precipitation, ash leaching, green liquor stripping, chemical balance

Innehåll

1	Introduktion	7
1.1	Mål och syfte	7
2	Koldioxidkemi	9
3	Koldioxidinfångning för massabruk	12
3.1	Tekniska förutsättningar	12
3.2	Tekniker lämpliga för 10-300 kton/år	14
3.3	Intressanta pilotprojekt	16
3.4	Alternativa lösningar för upp till 10 kton/år	18
4	Användningsområden för CO₂ i massabruket	20
4.1	Tvättning av brunmassa	20
4.2	Neutralisering efter alkalisk extraktion och peroxidblekning	21
4.3	Blekning nära neutrala förhållanden	21
4.4	Talloljeproduktion	22
4.5	Ligninproduktion	26
4.6	Asklakning	29
4.7	Strippning av grönlut	30
4.8	Tillverkning av fälld kalk (PCC)	33
4.9	Produktion av elektrobränslen	33
4.10	Sammanfattning	34
5	Massbalanssimulering av CO₂-användning i talloljekokeriet	36
6	Slutsatser och fortsatt arbete	40
6.1	Fortsatt arbete	42
7	Referenslista	43

1 Introduktion

Att minska inte bara de fossila, utan även de biogena CO₂-utsläppen har på senare tid blivit intressant som ett sätt att bekämpa klimatförändringarna. Diverse forskningsprojekt har därför genomförts med fokus på olika metoder för koldioxidinfångning, rening, lagring och även återanvändning inom t ex flytande bränsleproduktion (Liquid Wind 2025). Massabruk har nämnts som en lämplig kandidat eftersom deras absoluta utsläpp är relativt stora och, särskilt när det gäller mesaugnar, relativt koncentrerade och därmed lätta att fånga upp till rimligt pris och med relativt enkla anläggningar som kan fungera som en add-on till den ursprungliga fabriken.

Flera projekt om CCS/CCU-möjligheter i massabruket har genomförts (Jannasch et al 2019), med slutsatsen att mesaugnens CO₂-utsläpp är mycket riktigt den lägst hängande frukten i ett typiskt sulfatmassabruk, medan sodapannans och barkpannans rökgaser erbjuder mycket större CO₂-flöde, dock med lägre koncentration (Lindström 2023). Det fångade CO₂ kan därefter lagras enligt CCS-konceptet (Carbon Capture and Storage - koldioxidinfångning och lagring) eller användas som råvara till olika produktionsprocesser, t ex för ovannämnda flytande bränsle, vilket kallas för CCU (Carbon Capture and Utilisation - koldioxidinfångning och användning). Olika användningsapplikationer ställer olika krav på renheten, koncentrationen och den totala mängden CO₂.

Det finns enhetsoperationer i massabruket som använder CO₂ redan idag, och ytterligare processer som skulle kunna integreras med massabruket som också har ett behov av CO₂. Till den första kategorin hör pH-justering i talloljekokeriet, som i moderna anläggningar kan göras i två steg, varav det första med CO₂, och andra med H₂SO₄. Ett annat exempel på etablerade CO₂-användningar i ett massabruk är pH-justering och tvätthjälp i fiberlinjen. Det finns även ett antal nya processer som använder CO₂ och som med fördel skulle kunna integreras i massabruket, speciellt om en billig, intern källa till CO₂ är tillgänglig: ligninseparation, strippning av svavel från grönlut för intern NaOH-produktion, osv. Ytterligare processer där CO₂-användning är antingen väletablerad eller skulle kunna appliceras med stora ekonomiska och miljömässiga vinster finns i pappersbruk, med bl a pH-justering samt kontroll av kalciumkemin, vilket kan vara intressant för integrerade massabruk. Även i bruk tillverkande mekanisk massa finns det möjligheter att använda CO₂ med förbättrad drift som följd. Hur stora CO₂-flöde som alla dessa processer behöver, samt hur billigt en CCU-process skulle behöva vara för att göra dessa ekonomiskt attraktiva är dock i stort sett okänt.

1.1 MÅL OCH SYFTE

Syftet med detta projekt är således att utvärdera tekniska möjligheter samt potentiella ekonomiska fördelar med att använda brukets egna, infångade CO₂ inom interna processer. Projektet börjar med att bedöma potential till koldioxidinfångning i massabruket där prio ett är mesaugnen, beroende på mängden tillgänglig CO₂, och därefter sodapannan. Inom detta steg skall en kort genomgång av tillgängliga processer för småskalig koldioxidinfångning

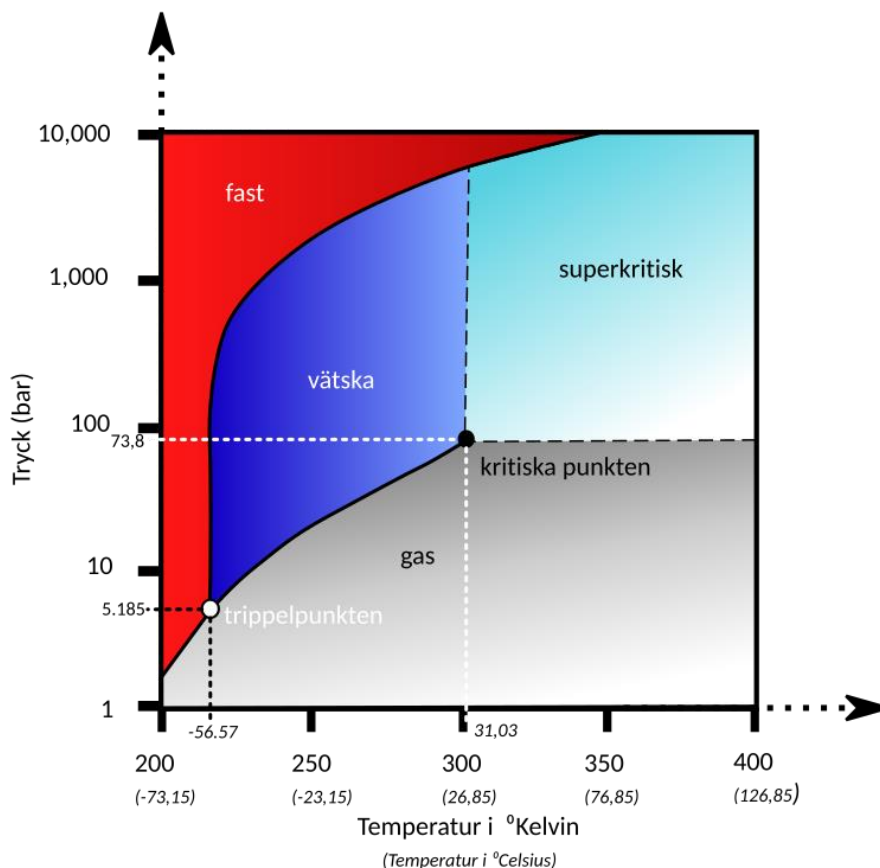
genomföras, där massabrukets specifika tillgångar (t ex el, värme och kemikalier) såsom begränsningar (t ex krav på flexibilitet, brist på fysisk plats, låg teknologisk tröskel) tas i beaktan.

Parallellt skall en utvärdering av de interna behoven av CO₂ i massabruket genomföras, där krav såsom mängder, renhet, temperatur osv, tas i beaktan. Både befintliga, etablerade processer och potentiella framtida applikationer kommer att undersökas till den mån en relevant information kan hittas, t ex med hjälp av litteratur, brukserfarenheter eller process- och kemikalieleverantörer.

Utvärderingen begränsas till applikationer inom massabruket och utelämnar integrerade pappersbruk eller andra integrerade processer. Slutligen skall vi illustrera ett exempel på potentiella fördelar med intern CO₂-användning genom att utvärdera systemeffekter, t ex förändringar inom Na/S-balanser, med hjälp av processimulering med RISEs referensbruksmodell.

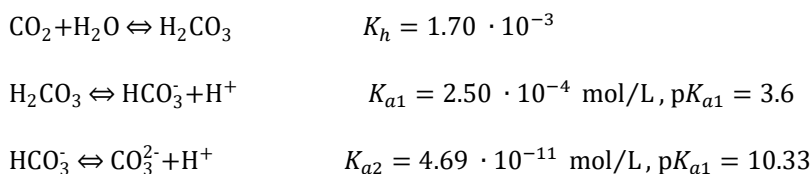
2 Koldioxidkemi

Koldioxid är en av de stabilaste kolföreningar och en slutprodukt av fullständig oxidering (förbränning) av rent kol samt organiska kolföreningar. Nuförtiden är koldioxidhalten i atmosfär omkring 420 ppm och stiger, vilket orsakar den globala växthuseffekten på grund av CO₂:s förmåga att absorbera infraröd strålning. Två, från den industriella synpunkten intressanta, egenskaper hos denna gas är att den inte kan forma vätska vid tryck under ~5.2 atm, utan sublimerar direkt från fastfas ("torr is") till gas. Dess kritiska punkten ligger dessutom vid relativt måttliga tryck- och temperaturnivåer, se Figur 1, vilket möjliggör praktiska tillämpningar av superkritisk koldioxid.

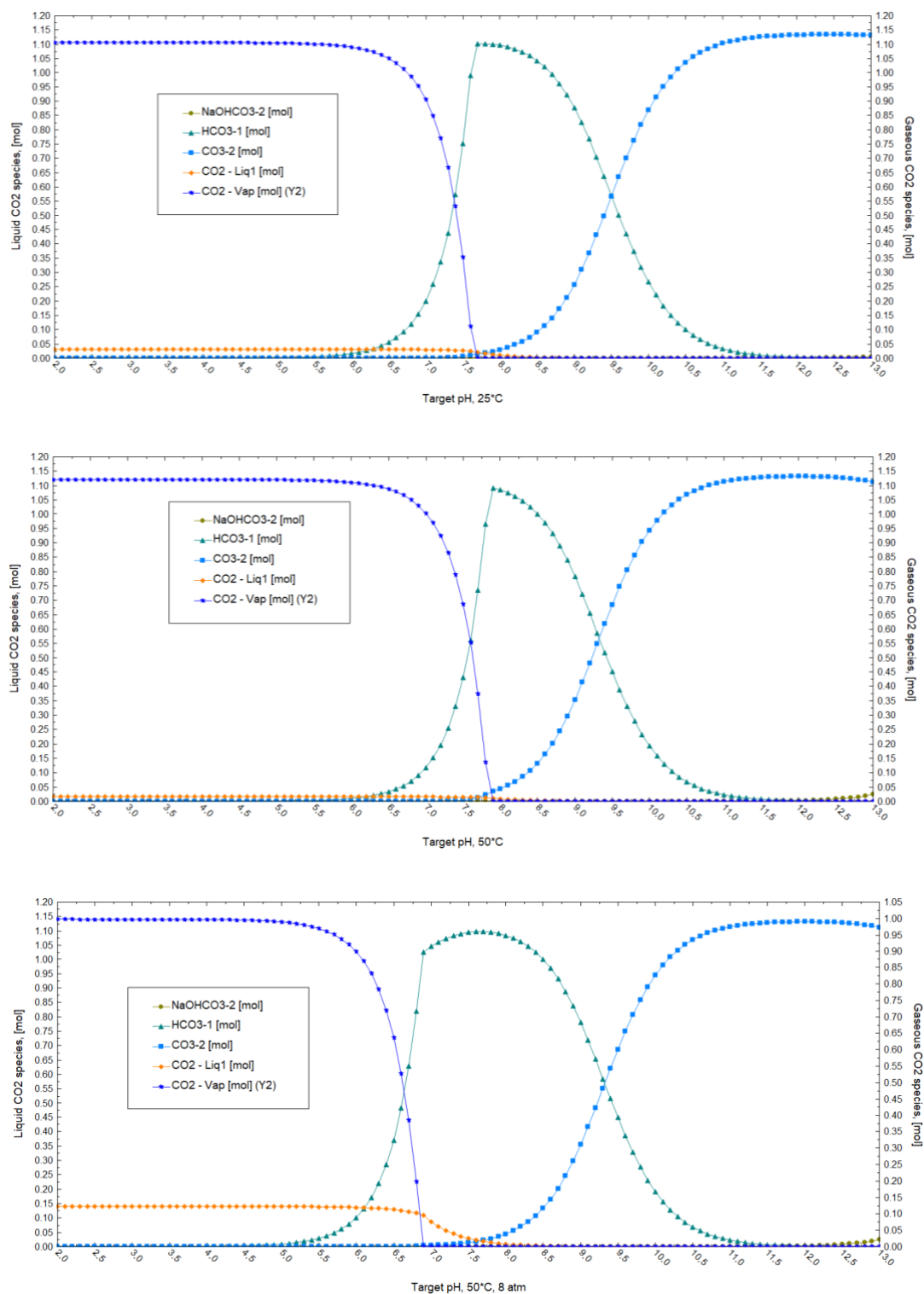


Figur 1. Fasdiagram för koldioxid. Ben Finney / Mark Jacobs, Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication for Wikimedia.

Vid rumstemperatur är koldioxid en färglös gas, praktiskt taget luktfri vid låga koncentrationer. Koldioxid löser sig lätt i vatten till en maximal koncentration runt 1.45 g/L vid 25 °C och bildar kolsyra, en svag syra, enligt följande reaktioner:



Man kan därför enkelt inse att i naturliga vattensystem samt inom praktiska industriella förhållande råder det en kemisk jämvikt mellan koldioxid i gasform, löst i vatten, vätekarbonatjon samt karbonatjon, se Figur 2. Lösligheten hos CO₂ ökar tydligt med tryck och minskar svagt med temperaturen; pK_a för deprotonering av kolsyran flyttar också svagt mot högre värde med ökande temperatur. Utifrån diagrammen på Figur 2 kan man inse att lägre temperaturer, högre partiellt CO₂-tryck och högre totaltryck gynnar både upplösning av CO₂ i vattensystem och dess dissociering till användbara vätekarbonat- och karbonatjoner. Eventuella massabruksprocesser som både fångar in och nyttjar CO₂ bör därför ta i beaktan dess kemiska beteende.



Figur 2. OLI Studio-simulering av en hypotetisk titreringsprocess, system: vatten-5% CO₂ vid 25°C (övre bild), 50°C (mitten) och 50°C under tryck (8 atm, nedre bild).

3 Koldioxidinfångning för massabruk

3.1 TEKNISKA FÖRUTSÄTTNINGAR

Ett sulfatmassabruk har två dominerande källor för koldioxidutsläpp: sodapannan och mesaugnen. Därutöver kan en eventuell bark- eller hjälppanna bidra med CO₂-utsläpp. Typiska data för rökgaser från ett bruk med en produktion på 500 000 ADt/år finns i en fallstudie från av Skoglund et al. (2023) och redovisas i Tabell 1.

Tabell 1. Typiska data för rökgaser på ett sulfatmassabruk. Data från för ett bruk i en fallstudie med produktion 500 000 ADt/år från Skoglund et al. (2023).

	Rökgasflöde [m ³ /h torr]	Temperatur [°C]	CO ₂ konc. [vol% torr]	H ₂ O-halt [vol%]
Mesaugn	45000	300	22	28
Liten sodapanna	100000	54	12	13
Stor sodapanna	300000	170	16	27
Barkpanna	110000	57	8	25

Sodapannans specifika utsläpp angivna av olika källor varierar kraftigt. En viss variation beroende på massabrukets råvara (barrved eller lövved), massautbyte och produkttyp (t ex oblekt hög-kappamassa för kartong vs. dissolvingmassa med låg utbyte och hög cellulosahalt), blekerislutning (huruvida en del organiska ämne från blekeriet hamnar i svartlut), talloljeutbyte samt ligninuttag är självklart helt normal. Skoglund et al. (2023) rapporterar utsläppet motsvarande 1887 kg CO₂/ADt, Kuparinen et al. (2019) anger 1600-2400 kg CO₂/ADt biogena utsläpp och 10-20 kg CO₂/ADt fossila utsläpp (stödbränsle vid start eller driftsproblem) i ett generellt fall, och 2239 samt 1755 kg CO₂/ADt för de två modellerade massabruk (integrerat Nordiskt bruk och fristående eukalyptusbruk). Lindström (2019) anger 1798 kg CO₂/ADt, och den senaste uppdatering av RISEs referensbruksmodell för ett nordiskt blekt avsalumassabruk som kör mest barrved visar 1980 kg/ADt. Ett genomsnittsvärde på **1950 kg CO₂/ADt** kan föreslås som en första uppskattning för generella infångningsberäkningar.

Även uppgifter om CO₂-utsläpp från mesaugnen varierar. Siffrorna från Skoglund et al (2023) som visas i Tabell 1 kan räknas om till att CO₂-flödet uppgår till 311 kg/ADt, vilket motsvarar 156 000 ton per år. Enligt RISE:s referensbruksmodell för state-of-the-art-barrvedsbruk år 2010 (Lovell et al. 2010) är CO₂-utsläppen 271 kg/ADt när eldningsolja används i mesaugnen och 317 kg/ADt när bark används; den senaste modellering för ett svenskt barrvedsbruk som producerar blekt avsalumassa är 323 kg CO₂/ADt. Andra studier, som den av Levfert och Grönkvist (2023), rapporterar utsläpp på 338-347 kg/ADt med eldningsolja och 389-403 kg/ADt med vedpulver eller pyrolysolja. Lindström (2023) rapporterar 341 kg CO₂/ADt från en mesaugn som använder bekolja, barkpulver och lite metanol. Slutsatsen är att specifika CO₂-utsläpp varierar något, men ett rimligt mellanvärde kan antas till **340 kg CO₂/ADt**.

Under de senaste åren har många utredningar gjorts inom området koldioxidinfångning och -användning (CCU) för massabruk, med liknande slutsatser. Rökgaserna från mesaugnen har identifierats som den mest lättillgängliga källan för koldioxidinfångning. Även om sodapannan genererar ett mycket större totalt CO₂-flöde, är de tekniska utmaningarna större. De flesta studier föreslår en integrerad förvätskningsanläggning, vilket möjliggör försäljning, lagring eller användning av infångad CO₂ i andra processer, såsom elektrobränsleproduktion.

För mesaugnar är post-combustion capture, dvs att avskilja koldixiden från rökgaserna, den enklaste metoden att implementera och genomgången i kommande avsnitt utgår från det. Det finns dock två andra metoder som är intressanta att nämna:

1. **Oxyfuel-förbränning**, dvs att köra mesaugnen med förhöjd syrgashalt för att få högre koncentration av CO₂ och dessutom öka kapaciteten (Air Liquide, 2025). Det är även möjligt att elda med ren syrgas vilket då ger ren CO₂ i rökgaserna vilket eliminerar infångningsteget, men produktionen av syrgas har då en kostnad istället. Lösningen kan vara intressant för bruk som har behov av utökad kapacitet i mesaugnen, eller om man planerar vätgasproduktion med elektrolysör som också ger syrgas.
2. **Elektrisk plasmakalcinering**, en lösning som exempelvis LimeARC jobbar med. Då används en eldriven plasma-generator som alstrar het gas för att kalcinera mesan (Energimyndigheten, 2019). Fördelar som nämns är nästintill ren CO₂ samt mycket snabb reaktion vilket ger mycket kompaktare reaktor än dagens roterande ugn. Denna teknik är intressant i ett scenario där det finns god tillgång till förnybar el men kan anses ligga längre fram i tiden då det medför stora förändringar av massabruket.

Det finns två huvudsakliga alternativ för infångning och användning av koldioxid (CCU) i massabruk:

1. **Direkt användning efter infångning och konditionering:** Detta system innebär att koldioxiden fångas in, renas och justeras i temperatur innan den används direkt. Det är ett "just-in-time"-system med minimal eller ingen lagringskapacitet. Fördelarna med detta system inkluderar enkelhet och låga investeringskostnader, vilket gör det lätt att implementera. Vissa applikationer kan till och med använda rökgaser direkt utan specifik infångning. Nackdelarna är att systemet är oflexibelt och känsligt för störningar, vilket kan leda till att problem sprider sig genom systemet.
2. **Infångning, rening, lagring och användning vid behov:** Detta alternativ är mer robust och inkluderar ett lager för koldioxid som kan hantera eventuella problem i infångningssystemet. Förutom infångningssystemet kräver detta alternativ även ett förvätskningssystem, vilket innebär högre investeringskostnader. Fördelen med detta system är att det kan ta emot extern koldioxid vid behov eller exportera koldioxid till andra processer eller för slutlagring, vilket innebär en kombination av CCS (Carbon Capture and Storage) och CCU.

3.2 TEKNIKER LÄMPLIGA FÖR 10-300 KTON/ÅR

Kapaciteter omkring 10–300 kton CO₂ per år innefattar ett intervall relevant för små till medelstora infångningsprojekt vid massabruk. Här ges en enkel översikt över grundläggande tekniker som är relevanta samt några exempel på vilka lösningar som finns att tillgå i skrivandets stund. Framsteget inom området är dock väldigt snabbt vad gäller både utveckling av grundläggande tekniker samt praktiska lösningar för effektiv implementering.

För post-förbränningsinfångning (CO₂ separeras ur rökgas efter förbränning) är i huvudsak följande tekniker relevanta:

- Kemisk absorption (amin-skrubber) – kommersiellt moget.
- Fysisk absorption – t.ex. hot potassium carbonate, mer specialiserat.
- Adsorption (fastfas) – nya sorbentmaterial, t.ex. MOF-filter.
- Membranseparering – kompakta enheter under utveckling.
- Kryogen separation – nischat (hög koncentration).
- Övriga innovativa – t.ex. karbonatisering i smält salt, bränsleceller m.m.

Amin-baserad absorption är dagens standard för CO₂-infångning och fungerar väl för massabrukens rökgaser. Tekniken bygger på att rökgasen bubblas genom en vätska (aminlösning) som kemiskt binder CO₂; därefter värms vätskan i en desorber där ren CO₂ frigörs och aminlösningen återvinns för kretslopp. Monoetanolamin (MEA), med ett värmebehov på ~3,5–4,0 GJ/ton CO₂ för regenerering, var det tidigaste lösningsmedlet och används därför fortfarande ofta som referens (t.ex. i standardiserade teknoekonomiska beräkningar) eller som benchmark mot andra tekniker. Idag finns förbättrade aminer och blandningar: t.ex. AMP/PZ (amino-2-methyl-1-propanol/piperazin) som kan sänka värmebehovet till ca 2,9 GJ/ton (Lindström, 2013). Flera leverantörer erbjuder mindre modulära infångningsenheter, exempelvis "Just Catch" (SLB/Aker) – en standardiserad anläggning på 100 eller 400 kton/år samt "CycloneCC" (Carbon Clean) – containerbaserade moduler för upp till 100 kton/år. Dessa minskar installationskostnad och tid.

Fysikalisk absorption innebär att CO₂ löses fysiskt i en vätska under tryck, utan stark kemisk bindning. Tekniken lämpar sig bäst för gaser med högre CO₂-halt eller vid högre tryck. I massabrukssammanhang är trycket atmosfäriskt, men CO₂-halten i mesaugnens gas (20%) är tillräckligt hög för att vissa fysikaliska lösningsmedel kan vara effektiva. **Hot Potassium Carbonate (HPC)** är ett karbonatbaserat system (Benfield-processen) som traditionellt använts för CO₂/H₂S-separation i t.ex. gödselindustri. HPC fungerar vid hög temperatur (~100–120 °C) och med CO₂-halterna >15%. En fördel är att lösningen (K₂CO₃) är icke-förstörande och billig, men den absorberar CO₂ långsammare än aminer om halten är låg. Enligt en ny utvärdering (Ytti, 2024) var HPC mer energieffektivt, billigare och hade bättre miljöprestanda än MEA för integration i både mesaugn och sodapanna. HPC kräver dock korrosionsresistent material och generellt större utrustning p.g.a. långsammare kinetik.

En alternativ väg är att använda fasta material som reversibelt binder CO₂-molekyler genom en fysisk interaktion (adsorption) istället för vätskeabsorption. Tekniker som PSA (Pressure Swing Adsorption) och VSA (Vacuum Swing) har länge använts för att rena gaser (t.ex. kväve ur luft, uppgradera biogas). För CO₂-infångning krävs specialiserade sorbenter med hög kapacitet vid relativt låg CO₂-partialtryck. Konventionella sorbenter är zeoliter och aktiva kol; nyare material inkluderar metall-organiska ramverk (metal-organic framework, MOF) och kemiskt impregnerade filter.

Svante Technologies (Kanada) är pionjär inom fasta sorbenter för CCS. De har utvecklat en roterande plattform med kassetter innehållande filter belagda med **MOF-material**. Processen växlar mellan att exponera filtren mot rökgas (för att adsorbera CO₂) och mot en het, svag vakuumström (för att desorbera CO₂). Hela cykeln går på under en minut, vilket möjliggör en kontinuerlig avskiljning. Fördelarna med Svantes system är enligt PulPaper News (2025):

- **Kompakt & modulärt:** Den snabba cykeln och höga sorbentytan ger mycket litet fotavtryck – de hävdar upp till 10 gånger mindre storlek än motsvarande aminsystém för samma kapacitet. Modulerna kan fabriksbyggas som enheter på <2 MW kapacitet var och staplas för önskad skala.
- **Lågt energibehov:** Värmebehovet är lågt då endast den bundna CO₂ ska avdrivas (sorbenten själv behöver inte värmas upp kraftigt). Dessutom kan spillvärme (~80–120°C) användas – t.ex. från massabrukets lågtrycksånga – för att regenerera MOF-filtret. Svante anger att deras process signifikant reducerar energiförbrukningen och totalkostnaden relativt aminer.
- **Ingen vätska, inga utsläpp:** Fast sorbent betyder ingen risk för lösningsmedelsförluster, t ex via degradering eller sidoreaktioner med oönskade komponenter i den behandlade gasströmmen. Avskiljningen sker utan att generera avloppsvatten eller andra restströmmar.

Membran erbjuder en annan lovande väg: Här driver man rökgasen genom en modul där halvgenomträngliga membran selektivt släpper igenom CO₂ snabbare än andra gaser. Resultatet blir en anrikad CO₂-ström på permeatsidan. Membranens fördel är att de saknar rörliga delar och kemikalier, och är kompakta (ofta tubulära eller spiralformade element likt filterkassetter). Nackdelen är att det behövs högt tryck över membranet – rökgas måste komprimeras till ~3–6 bar, vilket kostar el. En annan nackdel är att en anläggning innehållande endast membran presterar inte optimalt där höga avskiljningsgrader är av intresse, då membranet inte normalt fångar hela CO₂ i ett steg, utan lämnar en betydenade fraktion i retentatströmmen. Dessutom är renheten av permeatströmmen begränsad till 70–85% i ett steg då membranet inte är helt selektivt (Park et al. 2005). Den totala effektiviteten på membranavskiljning ökar dock med ökande CO₂-halt i den inkommande strömmen, vilket gör det möjligt att uppnå en acceptabel prestanda för rökgaser från massabrukets mesagn, där den inkommande CO₂-

halten ligger på ~20%. En möjlighet skulle kunna vara att kaskadera flera membraner, alternativt kombinera membran med annan teknik: t.ex. först köra rökgas genom membran för att höja CO₂ från exempelvis 12% till 50%, sedan låta ett mindre aminsysteem ta det sista. Ett annat alternativ är att använda membran i applikationer där mycket hög renhetsgrad på inkommande CO₂ inte är ett krav.

Aqualung (Norge) utvecklar membraner med funktionaliserade ytor som är optimerade för ~15% CO₂ och atmosfärstryck. De föreslår flerstegsmoduler med mellanliggande kompression för att nå önskad renhet. Aqualung hävdar lägre energikostnad än aminer (då det inte finns något behov för termisk regeneration, däremot mer el för kompression). De har inlett pilotförsök på marina motorer och små industriella källor (Aqualung, 2025).

Kryogena metoder kyller ned gasen tills CO₂ kondenserar som vätska (minst -56 °C vid 5,2 bar för att passera tripelpunkten). Det kräver mycket kyla och/eller kompression men är enkelt rent kemiskt. Sådana system lämpar sig egentligen bäst när CO₂-halten är hög (>90%), annars innebär det att man fryser ut koldioxid-is ur mycket kväve, vilket är ineffektivt. Kryogen teknik i ren form är troligen ej förstahandsvalet för massabruk med dagens halter. Men om framtida processer (som LimeArc eller oxyfuel) ger koncentrerade strömmar, kan kryo bli relevant som pålitlig metod att nå flytande/superkritisk CO₂ utan kemikalier.

Övriga lovande tekniker innefattar **smält salt-absorption** från **Mantel**, där smält boratsalt används för att absorbera CO₂ vid mycket höga temperaturer, vilket innebär att den restvärmen som produceras blir högvärdig och kan användas direkt för ångproduktion. För att kunna åstadkomma detta integreras processen med pannan där desorptionen konsumerar strålningsvärme vid 800°C och absorptionen genererar konvektiv värme vid 500°C som kan användas för att generera högvärdig ånga (Mantel, 2024). Idealt innebär detta att den totala ångproduktionen i massabruket inte minskar trots infångning av CO₂, förutom smärre förluster, vilket gör processen mycket intressant. Nackdelar borde dock vara att processen är relativt komplicerad och oprövad, där det finns risker med material vid de höga temperaturerna.

3.3 INTRESSANTA PILOTPROJEKT

I skrivandets stund finns inga bruk som fångar in koldioxid. Dock finns ett antal pilot- och demoprojekt för CO₂-infångning inom pappers- och massaindustrin runt om i världen som visar att det är på frammarsch. Här presenteras de mest intressanta projekten för att ge en fingervisning om hur långt utvecklingen har kommit.

Pilotprojekten syftar till att göra tester för att utvärdera tekniker och lösa tekniska utmaningar, exempelvis energiintegration och behov av gasrening. Fokus i projektet ligger på koldioxidinfångningen, men utmaningar med transport och lagring nämns också även om dessa ligger utanför denna studie. I Tabell 2 är det mest intressanta pilotprojekten sammanställda.

Tabell 2. Lista över intressanta pilotprojekt för koldioxidinfångning från pappers- och massabruk.

Bruk, företag (Land)	Teknik (infångningsteknik; kapacitet; rökgastyp)	Projektmål och finansiering
Skutskär, Stora Enso (Sverige)	Enzymförstärkt lösningsmedel kombinerat med en ny kompakt absorbator (RPB); ~2 ton CO ₂ /dag; sodapannans rökgaser	Testa CCS-integration med enbart spillvärme (energieffektiv drift); EU-finansierad pilot (H2020 ACCSESS)
Rauma, Metsä Group (Finland)	Mobil aminscrubber (Andritz); kapacitet ej angiven (pilot i ton-skala); sodapannans rökgaser	Utvärdera CO ₂ -infångning i bruksmiljö (data inför ev. uppskalning); företagsfinansierad (Metsä & Andritz)
Niigata, Hokuetsu (Japan)	MHI CO ₂ MPACT™ Mobile (aminabsorption); kapacitet ej specificerad (pilot); sodapannans rökgaser	Demonstrera MHI-teknik på biogena utsläpp (insamla design- & driftsdata); företagsfinansierad (MHI & Hokuetsu)
Wayagamack, Kruger (Kanada)	Mantel smältsalt-absorption (borsalt); ~5 ton CO ₂ /dag; panna ej specificerad (ångpanna nämns)	Testa Mantels teknik i pilotskala; finansieras av offentliga medel och företagen (Kruger & Mantel)
Värö, Södra Cell (Sverige)	Filterbaserad adsorptionsteknik (MOF); kapacitet och källan ej specificerade	Teknik- och affärsutvärdering för framtida storskalig infångning samt användning; finansieras genom Industriklivet (Energimyndigheten)

Ett av de första pilotprojekten genomfördes på Skutskär, där kemi- och energiintegration testades, med målet att bara använda lågtemperaturspillvärme (Stora Enso, 2024). Testerna vid Skutskär är en del av det större EU-finansierat ACCSESS-projekt, som utvecklar koldioxidfångande kemi och teknik med målet att uppnå kostnadseffektiv lagring av CO₂ i stor skala. I Rauma har pilotförsök också inletts med målet att bland annat undersöka behov av gasrening (Forest.fi, 2024). Ett liknande pilotprojekt pågår också i Japan på bruket Niigata (Mitsubishi Heavy Industries, 2024). Det mest intressanta pilotprojektet verkar vara vid Wayagamack bruk (Kruger, 2024), där Mantels nya smältsaltteknik ska demonstreras (se avsnitt 3.2). Om det lyckas, möjliggörs en banbrytande infångningsteknik med mycket små effekter på energi- och ångbalanser och därmed troligen också bättre ekonomi än andra tekniker. Detta då dagens tekniker har ett stort energibehov, där exempelvis Metsäs studier visar att bara 20% av energibehovet för infångning kan täckas av befintliga energiflöden på bruket.

Ett annat intressant pilotprojekt att följa upp under kommande åren är koldioxidinfångning vid kombinatet i Värö, som Södra driver i samarbete med kanadensiska Svante Technologies och som startad under 2026 (Södra 2025). För närvarande är det inte offentliggjort vilken position (sodapanna, mesaugn eller barkpanna) som CO₂ skall infångas samt vilken kapacitet som anläggningen tänkas ha. Syftet med projektet sägs vara bygga kunskap om tekniken, utvärdera möjligheter för storskalig infångning i framtiden samt utforska möjligheter att använda CO₂ i olika tillämpningar, vilket inkluderar även småskaliga förvätskningsstudier.

I Tabell 3 listas några intressanta **demoprojekt**, där målsättningen är högre med siktet inställt på storskalig infångning. I praktiken verkar de dock inte ha kommit så mycket lägre än pilotprojekten. Projektet i Ashdown skall använda fast

absorbent (PulPaper News, 2025), men leverantören Svante verkar ha flera liknande projekt på gång. Projektet i Vicksburg sägs använda icke-vattenbaserad amin vilket har lägre energiförbrukning än en konventionell aminbaserad teknik, och delfinansieras av bl a Amazon då de har intresse av att minska sina koldioxidutsläpp (Mante och Jacobsen, 2024). Förhoppningsvis kan Amazons inblandning leda till ett ökat intresse och aktivare utveckling inom projektet. Även Microsoft har en satsning på gång med företaget CO280 för att implementera Aker's teknik Just Catch i pappers- och massaindustrin men bruket är ännu ej offentliggjort (SLB, 2024). Slutligen har Södra gått med i satsningen Njord Carbon som vill erbjuda hållbara och kostnadseffektiva lösningar för koldioxidinfångning framöver, samt etablera en marknadsplats för handel med negativa utsläpp, men befinner sig ännu i en tidig fas (Södra, 2023).

Tabell 3. Lista över intressanta demoprojekt för storskalig koldioxidinfångning från pappers- och massabruk.

Bruk, företag (Land)	Teknik (infångningsteknik; kapacitet; typ av rökgaser)	Projektmål och finansiering
Vicksburg, International paper (USA)	NAS-absorption (icke-vattenbaserat amin); ~120 kton CO ₂ /år; panna ej specificerad	Demonstrera första fullskale-CCS i pappersindustrin; DOE-bidrag ~88 MUSD, medfinansiering från International Paper & Amazon
Ashdown, Paper Excellence (USA)	Fast sorbentfilter (Svante MOF-teknik); ~1,5 Mt CO ₂ /år; sodapannans rökgaser	Etablera fullskalig bio-CCS med negativa utsläpp (CDR-krediter); DOE-stöd 1,5 MUSD (förstudie), partners: Svante, Paper Excellence, Tenaska (för lagring).
Bruk ej offentliggjort (USA)	Aminabsorption (Aker Just Catch); ~800 000 t CO ₂ /år; brukets samlade rökgaser	Bygga nyckelfärdig stor demo (~2030) som mall för fler bruk; Microsoft har förköpt ~3,7 Mt CO ₂ -borttagning, projektutveckling av CO280 (förstudie med SLB-Aker JV).
Södra (Sverige)	Ej fastställt (troligen amin-CCS); ~1 Mt CO ₂ /år initialt (skalbar till ~5 Mt); brukets samlade rökgaser	Skapa komplett bio-CCS-värdekedja (infångning–transport–lagring) och kommersiella negativa utsläpp; förstudie finansierad av Södra, Verdane och Equinor

3.4 ALTERNATIVA LÖSNINGAR FÖR UPP TILL 10 KTON/ÅR

För bruk som bara är intresserade av att implementera ett fåtal tekniker för intern användning av koldioxid blir behovet relativt litet. Den enklaste lösningen blir då att köpa koldioxid från en gasleverantör. Dock kan leverantörerna ha svårt att leverera (till rimligt pris) beroende på avstånd från produktionen och transportmöjligheter. Vid uppgradering av biogas till biometan fås en relativt ren ström av CO₂ som normalt inte utnyttjas, vilket då kan vara en alternativ källa. Typisk storlek på en liten till stor biogasanläggning i Sverige är 10-50 GWh/år (Energigas Sverige, 2023), vilket ger 2–10 kton CO₂/år (antagit 10 kWh/Nm³ metan, 50% metanhalt och en CO₂-densitet 2 kg/Nm³).

Även om det kan vara tveksamt om det går att få ekonomi i en liten infångningsanläggning finns det flertalet lösningar och leverantörer för kapaciteter

under 10 kton/år. Exempelvis har en aminbaserad anläggning på 3,7 kton/år installerats på ett kraftverk i Österrike (Advanced Carbons Council, 2025). Egen infångningsanläggning möjliggör självförsörjning och har ett signifikant PR-värde. Dessutom kan den fungera som ett pilotprojekt för att skala upp till CCS eller andra tillämpningar, vilket är väldigt relevant för framtiden.

Ett sätt att få lönsamhet i små anläggningar skulle kunna vara att förenkla systemet så att investeringskostnaden sjunker. Systemet blir exempelvis betydligt enklare om man inte behöver förvätska koldioxiden, och dessutom sjunker driftkostnaden då det inte behövs någon el till kylmaskiner. Förvätskning kräver dessutom relativt hög grad av renhet, vilket ofta inte krävs för användningen av CO₂ i interna processer. Dock behövs troligen fortfarande någon typ av lager, vars optimala storlek får avgöras från fall till fall. Trycksatta tankar blir snabbt relativt dyra, så om det finns plats kan ballonglager vara en billigare lösning. Exempelvis har Spendrups en flexibel ballong för lagring av biogas som rymmer 400 kubikmeter gas (Spendrups, 2020). För ett lager som rymmer en timmes produktion vid 1 ton/h (ca 10 kton/år) behövs ca 500 m³.

4 Användningsområden för CO₂ i massabruket

Två kategorier av processer presenteras nedan 1) CO₂ i befintliga processer samt 2) nya processer för att göra nya produkter där CO₂ används. I de flesta av tillämpningarna inom den första kategorin används koldioxid för att ersätta en starkare syra när man behöver sänka pH. Detta har fördelen att pH-sänkningen sker stegvis och naturligt planar ut vid neutrala pH, vilket gör det enklare att nå målvärdet utan att råka komma under det. Risken för överdosering och för sur miljö (som kan skada fiberkvaliteten eller utrustningen) minskar därför. Den buffrande förmågan är dessutom fördelaktig i vissa sammanhang där man vill hålla pH stabilt (ex nära neutral blekning). Dessutom har kolsyra fördelen att inte störa de kemiska balanserna på massabruket som många andra syror gör (ex S, Cl och P-baserade mineralsyror).

4.1 TVÄTTNING AV BRUNMASSA

Tvättning av brunmassa (oblegt pappersmassa från kokprocessen) syftar till att avskilja svartlut från fibrerna. Genom att tillsätta CO₂ i tvättsteget – vanligtvis genom att injicera koldioxid i tvättvattnet eller direkt i massan – sänks pH-värdet i tvättzonen genom bildning av kolsyra. Detta milda syratillskott neutraliserar delvis den alkaliska massan och påverkar massans egenskaper (Bennett, 2000). Forskning har visat att den lägre pH-nivån minskar fibersvällningen och, vilket är viktigast, reducerar mängden instängd luft (skum) i massan (Luthe et al., 2003). Detta minskar givetvis behovet av skumdämpare. Mindre luft och skumbildning förbättrar dränering och tvätt, vilket leder till effektivare borttagning av COD-bärande substanser (organiskt material) och kvarvarande kemikalier så att de följer med svartluten ut. En renare massa minskar belastningen på efterföljande bleksteg och kemikalieåtervinning, samt möjliggör ökad kapacitet och minskad vattenförbrukning. Det finns rapporter som visar att Na och COD som följer med massan kan minska med 50% (Girard et al., 1999). Air Liquide, som erbjuder tekniska lösningar för CO₂-förstärkt brunmassatvätt nämner flera fysiska och kemiska fenomen som leder till förbättrad tvätteffektivitet. Fibersvällningen samt mängden luft instängd i/mellan fibrerna minskar vilket gör att mindre vatten behövs för att tvätta till samma renhet. Tvålföreningarna acidifieras, vilket leder till mindre skumning, samtidigt som CO₂ reagerar med svårslösliga kalciumtvålar vilket ger renare massa, lösliga Na-tvålar samt CaCO₃-partiklarna i bulkvåtskan. Ändrad jonstyrka både utanför och inuti massafiber påstås också förbättra diffusion av föroreningar från fibrerna. Slutligen påverkas tydligen mängden lösliga Ca-CO₃-komplexer (oklart hur, men sannolikt genom att framkalla CaCO₃-utfällning i bulk) vilket minskar överbäringen av inkrusteringsbenäget Ca till vidare processteg.

Behovet av CO₂ beror på massans utgångsalkalinitet och önskad pH-sänkning. Erfarenheter från fabriksförsök indikerar doseringar i storleksordningen några kilogram per ton massa. I ett försök varierade man t.ex. tillsatsen mellan cirka 2 och 6 kg CO₂ per ADt massa för att utvärdera effekten (Bennett, 2000). Om ett bruk redan har optimalt pH och mängden instängd luft i massan är så pass liten att den inte orsakar betydande skumning ger extra CO₂ begränsad nytta, men i de flesta

fall förbättrar det tvättresultatet avsevärt enligt Luthe et al. (2003). Slutligen drar de också slutsatsen att det är minskning av pH-värdet som ger effekten, så även annan syra bör kunna ge samma effekt. Dock framhåller Air Liquide att fördelen med CO₂, jämfört med t.ex. mineralsyror såsom H₂SO₄, är att det är en mild syra som är buffrande vilket minskar risk för överdosering och korrosion (Air Liquide, 2025).

4.2 NEUTRALISERING EFTER ALKALISK EXTRAKTION OCH PEROXIDBLEKNING

Efter ett alkaliskt bleksteg behöver pH ofta sänkas. Dessutom är det optimala pH-värdet ofta olika för blekning och tvättning av pappersmassa, och som nämnts ovan är det fördelaktigt att sänka pH vid tvätt av alkalisk massa. Traditionellt har detta gjorts med t.ex. svaveldioxidgas (SO₂) eller utspädd svavelsyra för att snabbt sänka pH. Koldioxid framhålls dock som ett bra och kostnadseffektivt alternativ för pH-sänkning efter alkalisk extraktion och peroxidblekning (Air Liquide, 2025).

I patentet av Lachapelle (1992) framhålls en unik fördel med CO₂ är att den inte omedelbart förstör kvarvarande oxidationsmedel. Till exempel, om lite väteperoxid finns kvar i massan när man tillsätter CO₂, så reagerar inte CO₂ direkt med peroxiden. Det innebär att blekningen kan fortgå under pH-sänkningen. Traditionella starka syror skulle snabbt förbruka resterande H₂O₂ (genom katalytisk nedbrytning), men CO₂ möjliggör att peroxidens blekeffekt fortsätter en stund tills pH stabiliserats. Resultatet blir högre slutljushet vid samma kemikaliesats, eller minskat kemikaliebehov för att nå en viss ljushet. I praktiken bubblar man in CO₂ i den blekta massans tvätt eller direkt i massasuspensionen efter bleksteget, tills önskat pH (ofta omkring neutral, pH ~5–7) uppnås (Lachapelle, 1992).

4.3 BLEKNING NÄRA NEUTRALA FÖRHÅLLANDEN

Det har visat sig fördelaktigt att köra sista klordioxidsteget (D-steget) vid nära-neutralt pH (~6–7) istället för konventionellt surt pH (~3,5). Detta uppnås genom att tillsätta koldioxid (CO₂) till massasuspensionen, vilket bildar en bikarbonatbuffert som stabiliserar pH under blekningen. Effekten blir att ljushetsreaktionerna gynnas medan sidoreaktioner dämpas. Forskning har visat att en sådan pH-stabilisering minskar behovet av klordioxid för att nå samma ljushet. Starrsjö (2021) visade dessutom att nära neutralt pH i D-steget kan sänka halterna av AOX (adsorberbara organiskt bundna halogener, ett mått på klorerade restprodukter) i blekeriets utsläpp med upp till ~30% utan att blekningseffektiviteten försämras. Denna typ av blekning har benämnts både Near-Neutral Brightening (NNB), exempelvis av Audet 2014 och Radiotis 2018, och ECF Light av Starrsjö (2021).

Typisk CO₂-dos är relativt liten – försök visade t.ex. att cirka 3 kg CO₂ per ton torr massa räcker för att spara ~3 kg ClO₂ per ton, utan försämrad ljushet eller massakvalitet (Ribeiro et al., 2014). I Starrsjös laborieförsök tillsatte 10 kg CO₂/odt (bedömt som högsta praktiskt rimliga dos) och även ett extremfall 30 kg CO₂/odt för att studera effekten av extra stark buffert. Resultaten visade att 10

kg/odt gav tydlig AOX-reduktion, medan en högre dos (30 kg) inte gav proportionellt större minskning av AOX än den lägre dosen. Tekniken har också testats i bruksmiljö (bl.a. rapporter av Audet 2014 och Radiotis 2018) och kunnat införas utan större investeringar.

4.4 TALLOLJEPRODUKTION

Såpan är en viktig komponent av svartlut och bildas i koket när extraktivämne från ved (främst från barrved) reagerar med alkali (Tall Oil Community 2025). Den råa såpan separeras från svartluten i lagringstankar, oftast i 1-3 tankar placerade vid början samt i mitten av indunstning, och tvättas för att minska överbäring av svartlut till talloljekokeriet. Därefter surgörs såpan, normalt med svavelsyra eller restsyra från klordioxidtillverkning, så att tvålarna – salter av fettsyror och hartsyror samt metallkationer, mestadels Na – omvandlas till en blandning av fria syror som kallas tallolja. Talloljan är inte löslig i den återstående vattenfasen, spjälkvätskan, och kan därför separeras då den har lägre densitet. Tallolja är ett värdefullt råmaterial som kan bearbetas till användbara biobaserade produkter, från enkla rengöringsprodukter ("grönsåpa") till kommersiell biodiesel (Preem 2019). Därför är produktionen av tallolja en viktig inkomstkälla för moderna massabruk och bruken strävar efter att maximera såväl den totala mängden som kvalitet.

Den typiska såpan som har separerats från svartluten, tvättats och är på väg till talloljekokeriet bör innehålla mer än 50% tallolja, mindre än 2% lignin, mindre än 0.3% kalcium, och mindre än 1% fiber. Resten utgör resterande svartlut vars mängd kommer att ha en stor påverkan på syrakonsumtion vid surgörning. Såpan med en ungefärlig sammansättning som ovan krävs som regel 180-210 kg H₂SO₄/t CTO (crude tall oil, rå tallolja), men även högre mängder, över 300 kg H₂SO₄/t CTO är inte helt ovanliga (Tikka 2008).

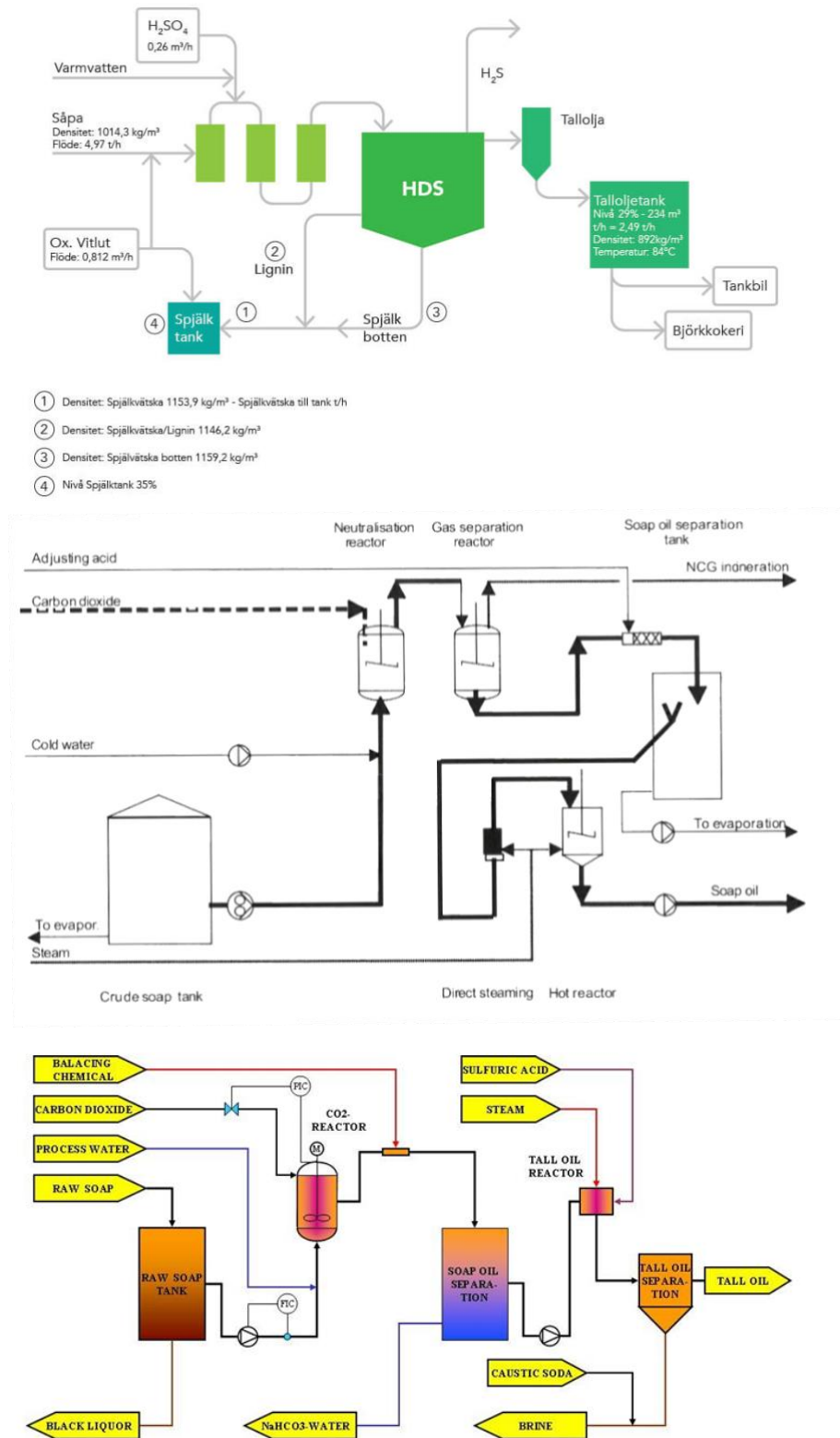
Surgörning av tvättad såpa har traditionellt utförts i en så-kallad "enstegsprocess" där pH-justeringsmedel (syran) tillsats bara en gång, och som består av fyra delsteg: uppvärmning av såpa, tillsats av syra, separation av den resulterande talloljan från spjälkvätskan och torkning av tallolja (Tikka 2008). Det finns dock en stor nackdel med ett sådant tillvägagångssätt: den H₂SO₄ som satsas i surgörningssteget utgör en betydande del av den totala svaveltillförseln till bruket och därför har en stor påverkan på den totala Na/S-balansen. Som konsekvens har majoriteten av barrvedsbruk med egen talloljeproduktion ett svavelöverskott som måste hanteras, vanligtvis genom att stöta ut ESP-stoffet från sodapannan. Detta innebär dock även stora natriumförluster som måste kompenseras med färsk makeup vilket innebär stora kostnader.

För att lösa just detta problem har en ny lösning föreslagits där såpan surgörs i två steg, och en annan syra används för att byta ut en del av svavelsyra. Enligt Tikka (2008) har två alternativ funnits intressanta i storskaliga applikationer: bisulfit från starkgasskrubben samt koldioxid. Koldioxidprocessen beskrivs som relativt enkel: råsåpan späds med vatten, CO₂ löses upp i vatten och formar en svag syra, vars primära roll är att neutralisera den residuala svartluten i råsåpan. Vid pH mellan 6

och 8 sker en fysisk process där blandningen utvecklar två skilda faser: den så kallade såpaoljan och den primära spjälkvätskan. Såpaoljan kan separeras från den rena delen av primära spjälkvätskan och skickas till vidareurgörning (detta steg kan göras med vanlig centrifugalspinnare då viskositeten är tillräckligt låg). Den separerade såpaoljan innehåller fortfarande 50% residual vätska som avskiljs vidare i nästa processteg.

Processen styrs genom att kontrollera pH, mängden CO₂ i gasfasen (som partiellt tryck) samt temperaturen. Koldioxidens löslighet i vatten är starkt temperaturberoende, se även Figur 2, och processen måste optimeras mellan kombination av hög löslighet, men hög viskositet och låg kinetik (vid lägre temperatur) och låg löslighet, men annars bättre körbarhet (vid högre temperatur). I praktiken väljer man att kompensera den lägre lösligheten vid den optimala processtemperaturen genom att öka trycket.

Vid 2008, rapporterade Tikka (2008) att två patenterade processer för förstastegssurgörning med koldioxid fanns: en tillhörande Polargas ägd av Air Liquide och en från AGA (Linde). I en typisk sådan process blandas råsåpan med kallt vatten, dels för att möjliggöra en effektiv upplösning av CO₂, dels för att sänka temperaturen till ~50°C, vilket ungefär fördubblar dess volym. Såpan pumpas sedan till en reaktor där den blandas med CO₂ vid 8-10 bar totaltryck, och sen skickas vidare till nästa reaktor där oreagerat CO₂, residual luft och mindre mängder svavelhaltiga gaser separeras och skickas till starkgassystem. pH kan då finjusteras med mindre mängd H₂SO₄ varpå såpan pumpas vidare via en statisk mixer till nästa reaktor där den värms upp med direkt ånga, reagerar färdigt med CO₂ och blir till såpaolja som skickas till nästa surgörningssteg, denna gång med svavelsyra.



Figur 3. En typisk layout av såpaprocessen med endast H₂SO₄-surgörning (Övre bild, Tall Oil Community 2025) och med CO₂-surgörning: Polargasprocessen (mitten, Tikka 2008) och en modern process från Air Liquide (nedre bild).

Tikka (2008) rapporterade 5 CO₂-surgörningsprocesser i drift i Finland år 2008. Vid RISEs genomgång av 2010-referensbrukskoncept (RISE reference mill model 2010, Lovell et al. 2011) som gjordes under 2018 blev slutsatsen att trots att det fanns kommersiella installationer för CO₂-surgörning i bruk verkade konceptet föga framgångsrikt. Detta var förmodligen dels på grund av höga investeringskostnader för extra trycksatt utrustning, dels för att många bruk ändå behövde blöda ut stora mängder ESP-stoft från sodapannan för att undvika K,Cl-ackumulering vilket gjorde att svavelöverskott inte var ett stort problem. Det diskuterades dock att konceptet skulle kunna bli mer attraktivt i framtiden när möjligheter till enkel stoftutblödning blir begränsade medan olika stoftbehandlingstekniker blir mer populära.

Även **Afry**, som jobbar som konsultföretag inom teknikbranschen och utvecklar generellt inte egna processer, har som undantag jobbat med talloljekokeriet, dock är det inte känt huruvida någon aktivitet inom detta fält pågår just nu. Anledningen har påståtts vara att även om Afry inte ville konkurrera med större utrustning- och processleverantörer har de ledande aktörerna inte visat mycket intresse inom teknikutveckling just för talloljeprocesser och därför fortsatte företaget sälja utrustning för såpavskiljning och talloljeberedning utvecklade av Pöyry. Afrys process hade en möjlighet att anpassas till att man använde CO₂ som ett första steg vid surgörning, och den främsta anledningen för detta teknikval sägs ha varit att vissa bruk hade stora begränsningar när det gäller möjligheten att ta in externt svavel. Ett exempel som nämndes var ett projekt för ett nytt bioraffinaderi som skulle byggas av Finnpulp i Kuopio. Då de preliminära byggplanerna fick avslag pga projicerade höga utsläpp av svavel till vatten ville man försöka minska H₂SO₄-användning genom att delvis byta ut det med CO₂. Kuopiobruk har dessvärre aldrig byggts (Pulpaper News 2022) så det är inte möjligt att bedöma hur stora besparingar i H₂SO₄-användning som den föreslagna lösningen skulle kunnat leda till, men upp till 30% och i vissa fall även 40% H₂SO₄ påstods vara möjligt att ersättas med CO₂.

Uppgifterna gällande mängden CO₂ som kan användas i talloljekokeriet varierar kraftigt. Tikka (2008) anger normal syrakonsumtion för talloljekokeriet i storleksordning 180-210 kg H₂SO₄/t CTO (crude tall oil, råttallolja), och upp till 300 kg H₂SO₄/t CTO vid dåligt tvättad såpa. Liknande siffror, 200-300 H₂SO₄/t CTO kan man hitta hos Kuparinen et al. (2019). 30% - 40% H₂SO₄ påstås kunna ersättas med CO₂ (upp till 50% vid dåligt tvättad såpa, Tikka 2008), i.e. 54-150 kg H₂SO₄/t CTO. Under ett antagande att en mol H₂CO₃ är ekvivalent med en mol H₂SO₄ vid surgörningsreaktionen, syrabehovet kan då uppskattas till 24-67 kg CO₂ kg/t CTO. Det är dock rimligt att anta att CO₂, som ursprungligen befinner sig i gasform, inte kommer att reagera med hundraprocentig effektivitet, och att den faktiska konsumtionen snarare kommer vara det dubbla. Detta skulle stämma med Lovell et al. (2011) som rapporterar 70-120 kg CO₂/t CTO. Vid en typisk talloljeproduktion på 30-50 kg CTO/ADt, CO₂-konsumtion kan beräknas till 0.73-6.0 kg CO₂/ADt, och som rimligast **3.0-6.0 kg CO₂/ADt**. Denna siffra stämmer även bra med Kuparinen et al. (2019), som anger 4-6 kg CO₂/ADt.

Det är svårt att förutsäga hur förutsättningar för att använda CO₂ i talloljekokeriet kommer att utvecklas i framtiden. Å ena sidan är det sannolikt att diverse

anläggningar för selektiv K,Cl-borttagning från ESP-stoft från sodapannan kommer att bli vanligare, vilket minskar massabrukens behov att dumpa ESP-stoftet och gör dem följaktligen ännu känsligare mot svavelöverskott i deras Na,S-balanser. För sådana bruk skulle talloljeanläggningar med lägre H₂SO₄-behov vara av stort intresse. Å andra sidan har moderna bruk börjat installera egna anläggningar för intern H₂SO₄-produktion där brukets svavelhaltiga gaser (starkgaser, gasutsläpp från ligninproduktion osv) förbränns till SO₂, konverteras sen till SO₃ och löses upp i vatten som H₂SO₄ för egen användning (Valmet 2018). Sådana bruk kan uppleva svavelunderskott även vid intensiv talloljeproduktion och skulle således behöva någon form av S-makeup.

Beslutet om CO₂-användning i talloljekokeriet måste därför övervägas noga där olika argument tas i beaktan: priset på H₂SO₄ eller andra alternativa S-makeupkällor, tillgängligheten, kvalitet och priset på CO₂, behovet att stöta ut ESP-stoftet, miljökrav osv. Det är tänkbart att ett högmodernt massabruk kan t ex köpa billig svavelmakeup, producera sin egen svavelsyra som används i blekprocesser och delvis i talloljekokeriet tillsammans med CO₂, medan överskott H₂SO₄ säljs till externa kunder eller används i diverse bioraffinaderiprocesser integrerade med massabruket.

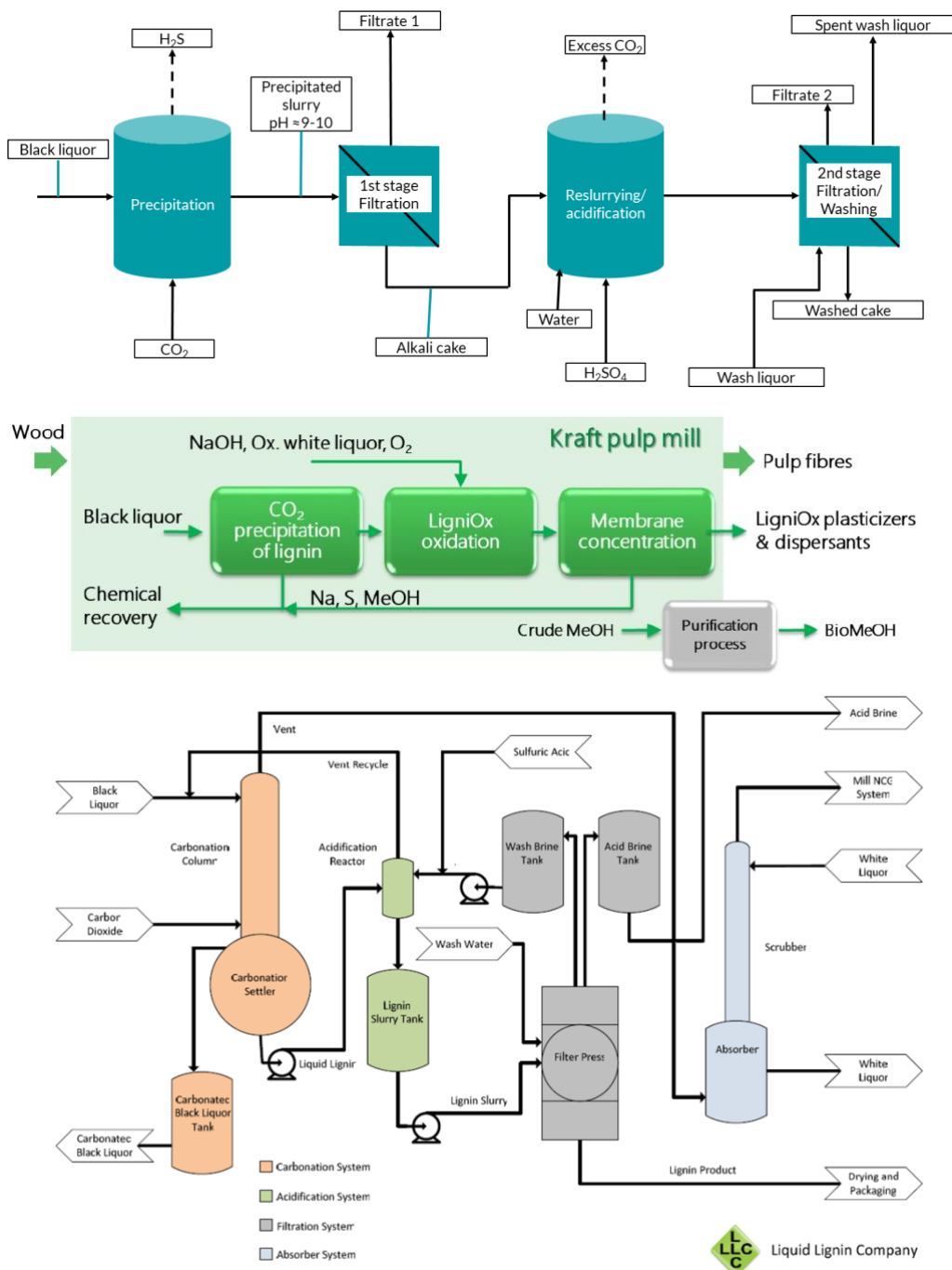
4.5 LIGNINPRODUKTION

Lignin är en av de viktigaste byggstenarna i ved då det ger nödvändig styvhet som gör att träden kan växa uppåt och nå väsentliga höjder. Från den kemiska synpunkten är lignin ett samlingsnamn till en grupp extremt komplexa molekyler byggda upp av tre monomerer: p-kumarylalkohol, koniferylalkohol och sinapylalkohol. I sulfatprocessen separeras ligninet ut från cellulosan och hemicellulosan mestadels i kokning, och resterande mindre mängder tas bort vid syrgasdelignifiering och, för vissa massatyper, i blekeriet. Det mesta av ligninet hamnar följaktligen i svartlut från koket, som vidare koncentreras genom indunstning och förbränns i sodapannan. Detta gör att massabruket kan både återvinna sina kokkemikalier och producera väsentliga mängder grön energi, som i fall av ointegrerade bruk räcker fullständigt till att täcka brukets egna behov medan överskottet kan säljas, vilket vanligtvis genererar betydande intäkter.

Eftersom ett modernt bruk har ett överskott av energi har man sedan länge utforskat möjligheter kring att selektivt plocka bort lignin från svartlut och på detta sätt minska sodapannans belastning samtidigt som en ny, biobaserad produkt kan ge bruket en ytterligare intäktskälla. Sulfatligninet är lösligt i alkaliska system och därmed i svartlut vid höga pH (hög restalkalihalt). De flesta patenterade teknikerna för ligninseparation börjar därför med att sänka pH på luten tills lignin faller ut, koalescerar eller på annat sätt separerar från svartlut. Den viktigaste skillnaden mellan olika kommersiella metoder för storskalig ligninframställning beror därför på förbehandling (t ex oxidering i LignoForce®, Noram 2025), efterbehandling (t ex oxidering/derivatisering i LigniOx®, Andritz 2025), specifika processförhållande (t ex hög temperatur och tryck i SLRP®, Lake och Blackburn 2014) eller specifik processutrustning (Lignoboost®, Valmet 2025).

De flesta teknikerna använder även CO₂ för att sänka pH i luten till 9-10, vidare används även H₂SO₄ för att färdigfälla lignin eller rena det (ta bort residuala metalljoner bundna till diverse funktionella grupper i ligninet) vid pH 2-3. Den specifika CO₂-konsumtionen i fällningsprocessen är då i princip lika med mängden koldioxid som behövs för att titrera svartlut ner till pH 9-10, plus eventuella förluster, t ex till gasfas pga otillräcklig omblandning och masstransfer. LignoForce®-processen påstås använda 20-40% mindre CO₂ tack vare naturlig pH-sänkning vid oxideringreaktioner.

Det kan vara svårt att hitta exakta siffror angående det specifika CO₂-behovet för ligninfällning, då det varierar mycket beroende på mängden lignin som tas ut samt svartlutsegenskaper, där det viktigaste troligen är restalkali som har störst påverkan på mängden CO₂ som behövs för att sänka pH till 9-10. Resultat från diverse projekt angående optimering av Lignoboost®- eller liknande fällningsprocesser på RISE visar att den typiska CO₂-konsumtion ligger runt 0.22 t CO₂/t torr ligninkaka från andra filtreringssteget (i.e. färdig ligninprodukt som den normalt säljs). För modelleringsändamål brukar RISE anta att ett typiskt lignininnehåll i svartlut från barrved ligger på 545 kg/ADt; med ett ytterligare antagande om 15-20% ligninuttag (82-110 kg/ADt) kan CO₂-behov räknas fram till 18-24 kg CO₂ kg/ADt. Denna siffra är något lägre än motsvarande resultat från Kujarinen et al. (2019) där CO₂-användningen antas ligga runt 150–250 kg per ton separerat lignin. För barrvedslut från vilken ca 20% lignin separeras är CO₂-användningen cirka 35 kg/ADt. Kouisni et al. (2012) hävdar att för LignoForce®-process kan CO₂-användning vara 20-40% lägre än i konkurrentprocesser och anger 500-600 kg CO₂ per ton separerat lignin för svartlut utan oxidering och 200-400 kg CO₂ per ton separerat lignin för oxiderad svartlut, vilket känns väldigt högt. Med produktionssiffrorna som ovan och 20%-ligninuttag skulle den specifika CO₂-användningen bli 50-65 kg/ADt för ickeoxiderad lut och 22-44 kg/ADt för oxiderad lut. Med hänsyn till den stora forskningserfarenheten kring processoptimering för ligninfällning på RISE känns det rimligast att anta att ligninproduktion i ett typiskt massabruk kommer att använda **mellan 20 och 50 kg CO₂/ADt** och att den nedre delen av det angivna intervallet känns mer sannolikt.



Figur 4. Exempel för olika processer för ligninframställning. Övre bild: layout för Lignoboost®-process, RISEs underlag för massbalanser; i mitten: LignioX med samtidig metanolproduktion, Kalliola et al. (2022); nedre bild: Sequential Liquid-Lignin Recovery and Purification (SLRP™), Lake och Blackburn (2014).

Slutligen kan några allmänna kommentarer kring CO₂-användning för ligninfällning anges. Separation av en del lignin från svartlut kan innebära stora fördelar för processen, inklusive avlastning av sodapannan om denna är flaskhalsen för produktionsökning, bättre kolekonomi med mindre biogent kol som konverteras till rökgaser samt en ny, potentiellt väldigt intressant produkt.

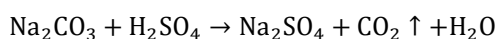
Samtidigt kräver en fullskalig ligninfällning en stor investering i en relativt komplicerad anläggning, samt innebär extra driftkostnader och en betydande påverkan på brukets energi- och kemikaliebalanser. Ligninseparation är därför fortfarande ganska ovanlig inom industrin. Under 2021 fanns det tre anläggningar: Lignoboost® i Domtar Plymouth och i Stora Enso Sunila, samt LignoForce® i West Fraser's Hinton-bruk. År 2025 finns Lignoboost® i Domtar Plymouth kvar och nya anläggningar har byggts i Mercer Rosenthal (småskalig) och Klabin, medan Sunilaanläggningen är inte längre i bruk. LignoForce® i West Fraser's Hinton är tydligen ur drift och till salu, samtidigt som LignaRec-process från Andritz byggs i Södra Cell Mönsterås. Metsä Fibre och Andritz bygger en pilotanläggning med LigniOx-tekniken i massabruk i Äänekoski.

Senaste utveckling kring skogsindustrins klimatpåverkan, inklusive Förnybartdirektivet (RED III 2023) och LULUCF-förordningen (LULUCF 2018) ställer krav på att avverkningsgraden i skogen ska minska samt att råvaran ska i första hand användas för produkter med högre värde (sågade trävaror, återanvändning) innan den används för energi (kaskadprincipen). Detta kan leda till krav på att en högre andel av det biogena kolet från trä hamnar i produkter snarare än i CO₂-utsläpp från energiproduktion, vilket kan motivera massabruk till att separera lignin för högvärdiga produkter. Fler nya produktapplikationer för lignin kan i sin tur skapa ett positiv feedback-system där mer lignin för nya produkter kommer att efterfrågas. Intresset för ligninproduktion, och därmed CO₂-användning, förutspås därför öka i framtiden.

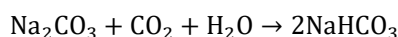
4.6 ASKLAKNING

Kalium, och i synnerhet klor, anses vara processfrämmande grundämne vars närvaro kan leda till ett antal olika driftsproblem i massabruket, exempelvis korrosion och beläggningar i sodapannan. Det finns ett antal olika processer för att avskilja K och Cl från lutcykeln. Asklakning är en av de vanligaste och enklaste processerna för att stötta ut dessa PFG:er utan att behöva blöda ut ren ESP-aska vilket annars ger betydande förluster av Na och S. I konventionell askutlakning tillsätts en begränsad mängd vätska (vatten eller kondensat) så att askan endast partiellt löses upp. Eftersom mängden K och Cl är begränsad löses dessa då upp snabbare och till större utsträckning, medan huvuddelen av natriumsalterna (framför allt Na₂SO₄) förblir i fast fas. Efter omrörning separeras den klorid- och kaliumrika lösningen från de fasta salterna (t.ex. med centrifug). Lösningen (vätskan) kan sedan blödas ut för att avlägsna K och Cl, vilket ger betydligt mindre förluster av Na och S (Hart et al., 2010).

Aska från moderna sodapannor innehåller inte bara Na₂SO₄ utan även betydande mängder natriumkarbonat Na₂CO₃. När halten karbonat överstiger 6-7 vikts-% blir avvattningen av fastfasen betydligt svårare, vilket leder till att klorid och kalium inte effektivt lämnar processen utan fastnar kvar med de återförda fastfaspartiklarna (Gonçalves et al. 2007). Därför är svavelsyratillsats i asklakningen en standardlösning för att hantera hög karbonathalt. Syran reagerar med natriumkarbonatet i askan så att CO₃²⁻-jonen protoneras till kolsyra, och sen faller sönder till vatten och koldioxid som avlägsnas enligt följande:



Att tillföra svavelsyra ger dock störningar i Na/S-balansen och ökar sulfiditeten. Air Liquide har därför föreslagit och patenterat en alternativ metod där koldioxid istället tillsats genom att bubblas in i tanken där askan blandas med vatten. Syftet är att sänka pH till så pass låga nivåer att en del av karbonatjonerna, CO₃²⁻, protoneras delvis till vätekarbonat, HCO₃⁻. Den tänkbara mekanismen är då att Na₂CO₃ från fastfasen successivt löses upp då jämvikten mellan fastfas och vätska förskjuts när CO₃²⁻-jonerna gradvis försvinner från lösningen. Reaktionen kan förenklas enligt:



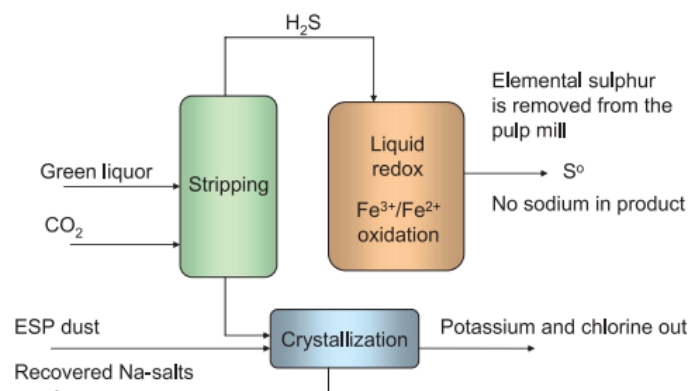
Enligt Air Liquides patent är utgångs-pH för askslurryn normalt ca 11.4–11.7, och den måste sänkas till ca 8–10 för optimal effekt (Alves & de Oliveira, 2017). Detta förefaller vara en intressant lösning och enligt Air Liquide ska det finnas en kommersiell installation men det är oklart hur bra det fungerat i praktiken.

Det finns inga uppgifter om den specifika CO₂-användningen för asklakningsprocessen och leverantören påstår att de faktiska siffrorna varierar mellan bruken och att uppgifter från specifika kunder kan således inte avslöjas. Vi har därför genomfört en enkel jämviktsimulering med hjälp av OLI Studio-mjukvaran (OLI 2025) där en 30%-vattenlösning av ett typisk ESP-aska med relativt hög Na₂CO₃-halt titreras med CO₂ vid 60°C. Resultatet visar att ungefär 9 g CO₂ /1000 g lösning behövs för att sänka pH från dess originella värde kring 11 till 9, vilket ger ungefär 30g CO₂ per 1000g ESP-askan. Lakningen av ~15 kg ESP-aska/ADt (vilket är en typisk mängd som antas i RISE processimulering) och ungefär 50%-ig effektivitet i CO₂-användning (då resten antas bli förlorad till gasfas utan recirkulering) resulterar således i **0.9 kg CO₂/ADt**.

4.7 STRIPPNING AV GRÖNLUT

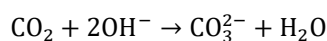
Välimäki och Sirén har föreslagit en process för att kunna kontrollera svavel, klorid, kalium och natrium. Det finns ett flertal olika metoder för att separera klorid och kalium men detta är den enda metoden som påstås erbjuda bruket ett verktyg att även finjustera svavelmängden i lutcykeln. Att kunna kontrollera Na/S-balansen på det föreslagna sättet har stora fördelar då det ger möjlighet att minimera behov av makeup och bli mer självförsörjande på processkemikalier. Den föreslagna processen visas schematiskt i Figur 5 och består av tre huvudsteg (Välimäki, Sirén 2013):

1. Strippning av svavel (H₂S) från grönlut med hjälp av koldioxid eller rökgaser.
2. Oxidering av vätesulfid till elementärt svavel genom en vätskebaserad redoxprocess.
3. Indunstning av strippad grönlut och ESP-aska för kristallisering av Na-CO₃-SO₄-salter vid hög CO₃-halt.

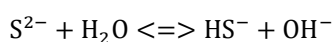


Figur 5. Schematisk bild av processen för att strippa grönlut med koldioxid eller rökgaser för att kunna kontrollera halterna av svavel, klorid, kalium och natrium i lutcykeln (Välimäki, Sirén 2013).

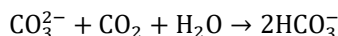
I steg 1 blandas rökgas och grönlut i en packad kolonn för att avskilja H₂S vid atmosfäriskt tryck. Här är fyra huvudsakliga reaktioner involverade, och i den första reaktionen (1) reagerar koldioxid och hydroxid för att bilda karbonat och vatten:



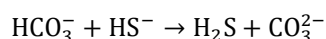
I jämviktsreaktionen (2) reagerar svavel med vatten för att bilda vätesulfid och hydroxidjoner:



Det bildade karbonatet från reaktion (1) går in i reaktion (3) med koldioxid för att generera vatten och vätekarbonatjon:

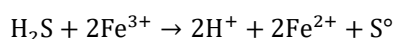


I den sista reaktionen (4) reagerar vätekarbonatet med vätesulfidjon för att bilda vätesulfidgas:

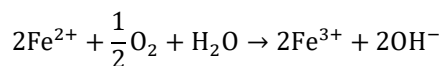


Gaserna som lämnar kolonnens topp innehåller uppskattningsvis cirka 80 % kväve, 1–2 % vätesulfid och resten är koldioxid om rökgas används i avskiljningen (Välimäki et al. 2015). En högre koncentration av vätesulfid är möjlig om ren koldioxid används vid avskiljningen istället. Från vad som går att utläsa från pilotkörningarna från Välimäki och Sirén verkar reaktionerna mellan grönlut och CO₂ gå relativt långsamt. Det finns därför frågetecken hur effektivt och ekonomiskt det går att göra detta steg, även om de framhåller att i fullskala kommer man använda en betydligt högre kolumn som blir effektivare. Att en betydande del av koldioxiden passerar utan att reagera tyder på att det behövs någon typ av recirkulation, vilket de indikerat i processchema över piloten men inte diskuterar.

Gaserna processas sedan vidare i en redoxreaktor där en alkalisk vätska används för att skrubba och lösa vätesulfiden i närvaro av järnkelatkatalysator. I denna reaktion (5) kommer det trevärda järnet att splittra vätesulfiden till vätejoner och elementärt svavel:



Det trevärda järnet regenereras därefter genom en reaktion med syre och vatten (6):



Det erhållna elementära svavlet kan vidare bearbetas till flera olika tillämpningar, såsom svavelsyra (Välimäki, Sirén 2013) eller polysulfidlut.

Den avskilda grönluten blandas med ESP-aska för att kristallisera natriumsalterna. Denna blandning kommer då att ha ett högre karbonatinnehåll och lägre sulfatinnehåll jämfört med ESP-aska upplöst i enbart vatten, vilket är fördelaktigt eftersom huvudsakligen burkit, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{Na}_2\text{SO}_4$, kommer att fällas ut med begränsad bildning av glaserit (aftitalit), $(\text{K},\text{Na})_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$. Glaserit innehåller K, vilket begränsar den konventionella separationsprocessen baserad på kristallisation, och följaktligen har den föreslagna processen en bättre separation av K i relation till natriumförlust. De återvunna natriumsalterna separeras från vätskefasen och skickas sedan tillbaka till återvinningscykeln medan klorid och kalium avlägsnas (Välimäki et al. 2015). I den konventionella processen för lakning eller kristallisation av aska resulterar hög karbonathalt vanligtvis i svårigheter vid fast-vätska-separationen, men i detta fall är halten alltså så pass hög att det är andra salter som har andra egenskaper, och Välimäki et al. (2015) hävdar att deras process resulterar i kristaller som är lätta att separera.

Strippad grönlut kan också användas för att producera sin egen NaOH (alkali), genom att kausticera den i en separat tank. Detta patenterades av Romantschuk och Vuojolainen redan 1977 och verkar ha använts i ett fåtal industriella installationer (i alla fall på ett sulfidbruk i Tampella enligt Hans Arne (H. Arne, personlig kommunikation, 8 november 2013)). Deras metod för grönlutsstrippning skiljer sig från den ovan beskrivna från Välimäki och Sirén genom att dela upp strippningen i tre steg med recirkulationer emellan. Reaktion 1-2 ovan sker därmed i första reaktorn, Reaktion 3 i andra reaktorn och Reaktion 4 i reaktor tre. De skriver också att det är fördelaktigt att ha NaHCO_3 i 20-80% överskott. Designen verkar kunna ge en effektivare process där gasflöden av "förbrukade" rökgaser (de föreslår inte att använda rent CO₂) separeras för sig. I sista steget strippas H₂S av med ånga vilket gör att man kan få högkoncentrerad H₂S efter att vattenångan kondenserats, vilket är fördelaktigt då den kan användas direkt till svavelsyraproduktion. För varje mol H₂S går det enligt deras beräkningar åt 1.1 mol CO₂, och 70% av koldioxiden påstås utnyttjas i processen. Därmed går det i praktiken åt 1.6 mol CO₂ per mol H₂S vid användning av rökgaser. Vid användning av ren CO₂ blir processen ganska annorlunda så det är svårare att uppskatta.

Även med detaljerad information angående reaktionsförloppen och effektiviteten med vilken CO₂ kan absorberas i grönluten skulle den specifika konsumtionen vara svår att uppskatta då den beror kraftigt på mängden NaOH och H₂SO₄ som bruket önskas tillverka och således mängden grönlut som behöver strippas. Då en mol Na_2CO_3 ger exakt 2 mol NaOH vid fullständig kausticering kan man dock uppskatta att **11 kg CO₂/ADt** skulle användas vid tillverkning av 10 kg/ADt internt NaOH och 50%-ig effektivitet på gasabsorption.

4.8 TILLVERKNING AV FÄLLD KALK (PCC)

Nanri et al. (2008) beskriver en process för att producera högkvalitativ fällningskalk eller kalciumkarbonat (PCC) som används som fyllmedel vid papperstillverkning. Denna process borde vara mest intressant för integrerade bruk, men produkten bör ju även vara möjlig att sälja externt. Processen utgår från mesa, dvs. kalciumkarbonaten som produceras under kausticeringen extraheras och används som pappersfyllmedel. För att uppnå rätt kvalitet måste morfologin kontrolleras hos kalciumkarbonaten genom att noggrant styra släcknings- och kausticeringsreaktionerna.

I processen av Nanri et al. (2008) ersätts den uttagna fällningskalken med bränd kalk, vilket minskar belastningen på mesaugnen. De till och med föreslår att man helt kan utesluta mesaombränningen, men frågan är om det är realistiskt och om det finns så stort behov av PCC. Mer relevant för denna studie är konceptet av Han et al. (2021) då den är likartad men inkluderar användning av CO₂. Deras tanke är att bara använda mesa som stöts ut, och uppgradera den till PCC: Först värmebehandlades mesan och maldes sedan till små partiklar. Dessa förflockades med kalciumoxid med hjälp av joniska polymerer, och koldioxid injicerades för att producera vad de kallar hybrid kalciumkarbonat (HCC). Tyvärr finns det inga uppgifter om koldioxidförbrukning i artikeln. Dock simulerar Kuparinen et al. (2019) tillverkning av PCC med hjälp av att bubbla rökgaser från mesaugnen genom grönlut och utgår då från en produktion av 33 kg CaCO₃/ADt vilket motsvarar en CO₂ användning av 20 kg/ADt. De har dock ingen detaljerad beskrivning av hur processen ser ut eller fungerar. Detta förslag måste därför bedömas som högst oklart, och dess nytta tvivelaktig, speciellt med hänsyn till att PCC för pappersproduktion verkar inte vara en bristprodukt just nu. Det kan dock fortfarande vara intressant för framtiden och värt att hålla i minnet.

4.9 PRODUKTION AV ELEKTROBRÄNSLEN

Elektrobränslen framställs genom att kombinera infångad koldioxid med förnybar vätgas. Produktion av elektrobränslen är egentligen utanför fokus för denna rapport då det inte direkt kopplar till massabrukets befintliga process. Det kan dock vara intressant att titta närmare på om man utreder en anläggning för infångning av koldioxid, där det egentligen bara är tillgången på billig grön el som begränsar hur mycket av den koldioxid som finns tillgänglig på bruket som kan användas. Potentialen för elektrobränsle i massabruket avhandlas i Energimyndigheten (2019) och denna rapport rekommenderas för vidare läsning.

Konceptet att producera elektrobränslet vid massabruket låter intressant, men har ett antal tydliga nackdelar. Applikation inom elektrobränsletillverkning ställer relativt höga krav på renheten hos CO₂: nära 100 % är idealiskt, men i praktiken accepteras ofta 95–99 %. Beroende på katalysatorn som används i syntesprocessen kan specifika krav på enskilda komponenter förekomma, t ex svavelhalt under 1 ppm. Dessutom, att förbränna biomassa och släppa ut CO₂ för att producera energi, och sedan använda denna energi för att fånga CO₂, tillverka H₂ och slutligen producera biobränsle känns onödigt komplicerat jämfört med t ex en möjlighet att producera biobränsle direkt genom att förgasa biomassan. Elektrobränsleproduktion integrerad med ett massabruk skulle därför kräva

ytterligare fördelaktiga omständigheter, t ex i form av en billig extern energikälla för elektrolysen såsom en vindpark intill bruket. Ett annat alternativ som har diskuterats är en möjlighet att jämna ut svängningar inom elektricitetens pris och tillgänglighet, dvs producera elektrobränsle endast när elpriset är lågt eller till och med negativt för att undvika ekonomiska förluster i bruket. Problemet är dock att moderna elektrolysanläggningar kräver stora investeringar som kan vara svåra att motivera för endast ett ryckvis återkommande bruk där styrning kan dessutom kräva en stor tidsprecision. Det är således nästintill omöjligt att beräkna det specifika CO₂-behovet som i bästa fall begränsas endast av tillgång till billig el.

4.10 SAMMANFATTNING

De mest relevanta koncepten för intern användning av CO₂ sammanfattas i Tabell 4, där tillverkning av fälld kalk, och elektrobränslen exkluderades då de innebär stora investeringar, processerna är oprövade och faller utanför fokus på detta arbete. Ligninproduktion och strippning av grönlut med egen produktion av alkali och svavelsyra innebär också större investeringar och processförändringar, särskilt för den senare som är relativt oprövad. Båda teknikerna möjliggör dock stora vinster och är direkt kopplade till den befintliga processen på bruket, varav de bedömds som både intressanta och relevanta att ha med här. Övriga tekniker innebär relativt små förändringar men samtidigt optimering och effektivisering av befintlig process vilket också är mycket intressant för ett massabruk.

En intressant fråga, som vi tyvärr inte kunde utforska i tillfredsställande grad i den här studien är krav på renheten för de diskuterade CO₂-applikationerna. Tyvärr finns det väldigt lite data rörande denna fråga. De kommersiellt etablerade applikationerna: massatvätt, neutralisering, pH-kontroll vid bleking eller talloljeproduktion körs vanligtvis med extern CO₂ som säljs som standardgas av teknikleverantören. Denna CO₂ produceras normalt genom infångning inom livsmedelsindustrin eller vid biogastillverkning och har därför mycket hög renhet. Eventuella effekter av större mängder föroreningar har således inte studerats i detalj, men det kan spekuleras att så länge närvaro av föroreningar inte innebär risker för produktkvalitet (t ex partiklar som kan fastna i massan), negativa sidoreaktioner (t ex oxidering med rest-O₂ från gasströmmen) eller hantering av onödigt stora flöden (t ex gasutspädning med N₂) skulle även lägre renhetsgrader kunna accepteras. Tillverkning av elektrobränsle kräver vanligtvis att ämnen som kan förgifta katalysatorn avlägsnas helt från CO₂-strömmen. Å andra sidan skulle strippning av grönlut eller ligninfällning i teorin kunna köras med något koncentrerade rökgaser istället för ren CO₂; dock måste man tänka på vissa utmaningar, t ex komprimering av stora gasflöden för att uppnå tillräckligt hög grad av CO₂-upplösning. Vi rekommenderar därför att frågan om renhetskrav för de olika CO₂-applikationerna studeras vidare inom fortsatt arbete.

Tabell 4. Sammanfattning av de mest relevanta teknikerna för intern användning av CO₂, med fokus på mängd CO₂ som behövs samt förväntad effekt på bruket processer. De fem första innebär mer optimering och effektivisering av befintliga processer medan de två sista innebär omfattande förändringar.

Teknik	Tillsatt mängd CO ₂	Påverkan på processen
Tvättning av brunmassa	2-6 kg CO ₂ /ADt	Högre tvätteffektivitet och/eller minskning av tvättvatten samt högre konc på massa ut Mer COD + joner till svartluten samt högre TS Sänkt förbrukning av blekkemikalier och skumdämpare
Neutralisering efter alkalisk extraktion och peroxidblekning	~2 kg CO ₂ /ADt (uppskattningsvis)	Högre tvätteffektivitet och bättre avvattnings med högre konc på massa efter tvätt
Blekning nära neutrala förhållanden	3-11 kg CO ₂ /ADt	Minskad ClO ₂ förbrukning (särskilt löv) och kemikalier för ClO ₂ produktion Minskad förbrukning av alkali och H ₂ SO ₄ Minskad AOX-bildning för samma ljushet
Talloljeproduktion	3-6 kg CO ₂ /ADt	Runt 30% mindre H ₂ SO ₄ Minskad överskott S i Na/S-balansen, minskad behov att stöta ut ESP-aska CO ₃ till indunstningen kan ge inkruster
Asklakning	~1 kg CO ₂ /ADt	Ersätter H ₂ SO ₄ vilket eliminerar påverkan på Na/S-balansen Den lakade askan blir lättare att separera
Ligninproduktion	20-50 kg CO ₂ /ADt (15-20% ligninuttag)	Ny(a) produkt(er) Avlastar sodapannan Stort intag av H ₂ SO ₄ som påverkar Na/S-balansen Påverkar drift av indunstning och sodapanna
Strippning av grönlut (med möjlig egen produktion av alkali och svavelsyra)	11 kg CO ₂ /10 kg NaOH	Uttag av S möjliggör kontroll av Na/S-balansen Ersätter köpt alkali eller oxiderad vitlut i blekeriet Självförsörjande och möjlig export av H ₂ SO ₄

5 Massbalanssimulering av CO₂-användning i talloljekokeriet

RISE:s referensbruksmodell användes för att visualisera effekterna i hela massabruket av att ersätta en del av svavelsyratillsatsen med koldioxid i talloljekokeriet, i.e. en lösning som beskrivs i kapitel 4.4. Referensbruksmodellen innehåller huvudsakligen de flesta processerna inom fiberlinjen och i återvinningscykeln för ett kraftmassabruk. I det här fallet har utgångspunkten varit ett barrvedsmassabruk.

I talloljekokeriet inom referensbruksmodellen tillsätts det normaltvis en blandning av svavelsyra och natriumsesquisulfat, en restprodukt från klordioxidtillverkning. Syftet med den här undersökningen var att studera effekterna av att ersätta en del av svavelsyratillsatsen med koldioxid. Dessutom var också målet att se en möjlig potential gällande den ekonomiska aspekten.

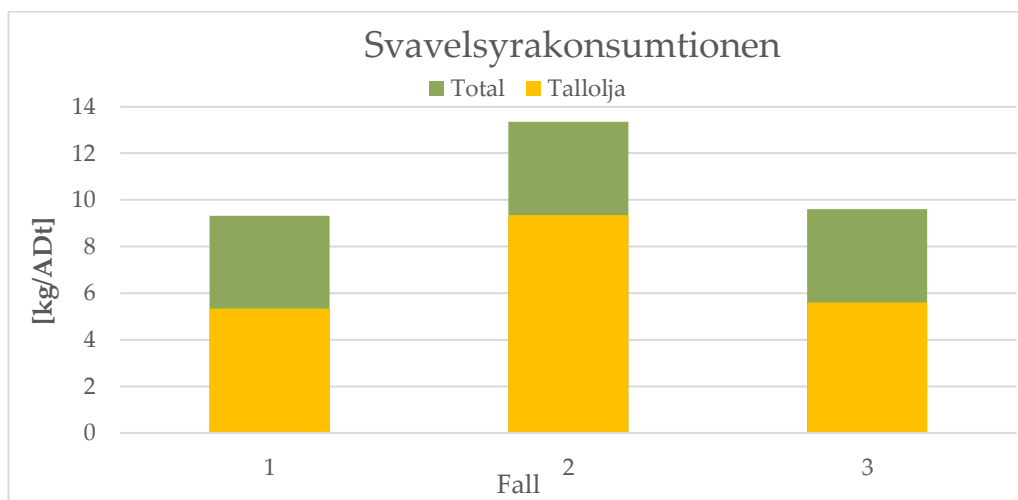
Simuleringarna genomfördes i tre olika fall som redovisas i Tabell 5. Fall 1 kan anses vara referensfallet, det vill säga att tillsatsen består av natriumsesquisulfat och svavelsyra. Vidare representerar fall 2 scenariot om det endast tillsätts svavelsyra till talloljekokeriet. Den mängden natriumsesquisulfat som tillsattes i Fall 1 räknades om till den ekvivalenta mängden svavelsyra för att kunna bestämma den totala svavelsyratillsatsen i Fall 2. Fortsättningsvis i Fall 3, ersattes 40% av svavelsyrans massflöde från Fall 2 med koldioxid.

Tabell 5. De simulerade tillsatserna till talloljekokeriet.

Fall	1	2	3
Natriumesquisulfat [kg/ADt]	8.54	-	-
Svavelsyra [kg/ADt]	5.34	9.35	5.61
Koldioxid [kg/ADt]	-	-	5.36

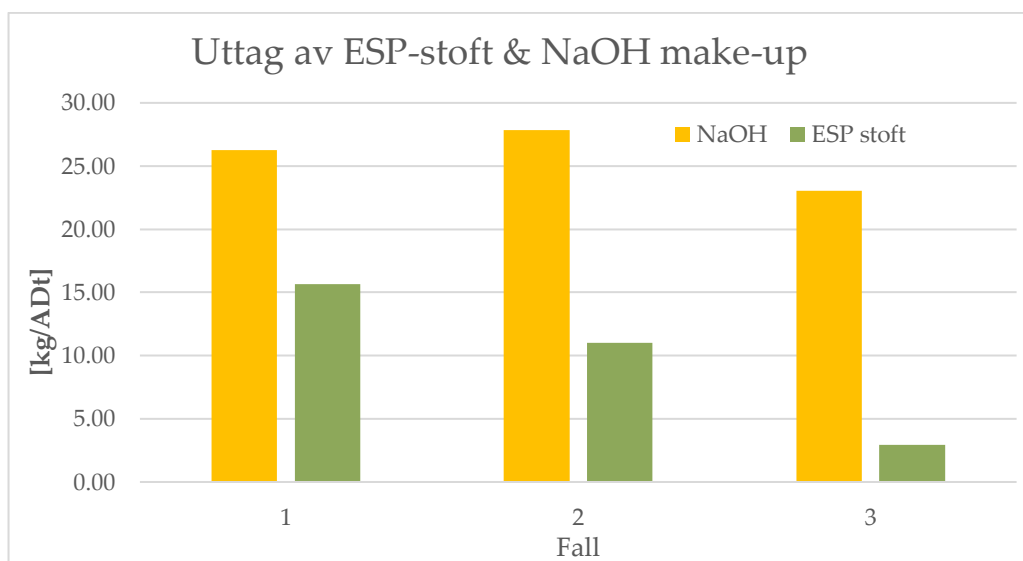
Resultatet visar självfallet en minskning av svavelsyrakonsumtionen i talloljekokeriet när den delvis ersätts med antingen koldioxid eller natriumsesquisulfat. I Figur 6 visas svavelsyraförbrukningen i talloljekokeriet respektive den totala förbrukningen för hela massabruket. Det visade sig att svavelsyraförbrukningen kan sänkas ungefär med 3.75 [kg/ADt] genom att endast ersätta 40% av svavelsyratillsatsen med koldioxid i talloljekokeriet.

Svavelsyraförbrukningen i Fall 1 och 3 är jämförbara, eftersom de ligger ungefär på samma nivå. Skillnaden är givetvis att mindre svavel tillsätts i Fall 3, då svavlet som annars kommer med natriumsesquisulfaten inte kommer med i det här fallet. Vilket förstås ger en vidare påverkan på massabruket.



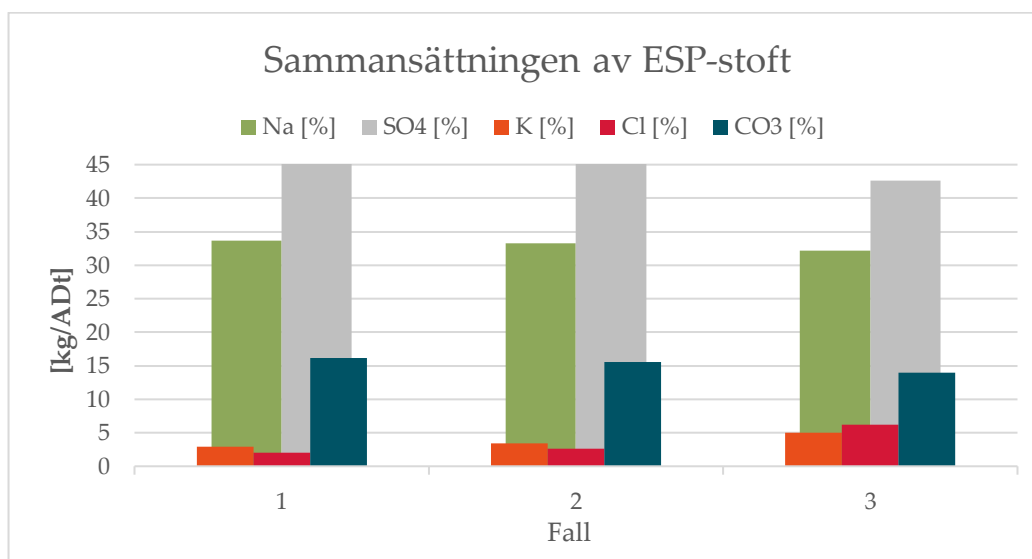
Figur 6. Den totala svavelkonsumtionen i massabruket respektive den till talloljekokeriet för alla tre fallen.

Utremsningen av ESP-stoft från sodapannan är något som direkt påverkas av förändringar i svaveltillsatsen generellt. Sulfatmassabruk som använder barrved som råvara har som regel ett överskott av svavel i sina natrium- och svavelbalanser just på grund av svaveltillförsel till taloljekokeriet (såvida bruket inte producerar sin egen interna svavelsyra genom t ex förbränning av starka gaser). Detta överskott hanteras vanligtvis genom ett kontrollerat uttag av ESP-stoft. På detta sätt förhindras sulfiditeten från att stiga okontrollerat, men den natriumförlusten som också sker vid ESP-stoftuttaget måste kompenseras för i form av Na-makeup. I det här fallet när tillsatsen av svavel in till talloljekokeriet minskar får det en direkt effekt på uttaget av ESP-stoft som minskar avsevärt. Detta leder till minskad förlust av natrium i processen, vilket gör att make-up behovet av natriumhydroxid in till bruket också minskar. Utifrån en ekonomisk synvinkel, kan denna besparing på make-up anses vara mycket gynnsam.



Figur 7. Uttag av ESP-stoft och tillsatsen av natriumhydroxid make-up i all tre fallen.

Reduktionen av ESP-stoft uttaget innebär också andra medföljande konsekvenser. Uttaget av ESP-stoft från sodapannan används inte bara för att kontrollera Na/S-balanserna utan även ackumulering av processfrämmande grundämnen klorid och kalium då dessa anrikas i stoftet. ESP-stoftet som inte tas ut cirkuleras tillbaka till återvinningscykeln först genom indunstningen och denna tillbakacirkulering ökar när mindre stoft tas ut. Det leder till att koncentrationen K och Cl i processen ökar i stället. I Figur 8 visar grafen hur massprocenten av kalium och klorid i ESP-stoft ökar i Fall 3 på grund av ett reducerat uttag. I det här fallet är det möjligt att observera att både kalium- och kloridhalterna överskrider de rekommenderade gränserna på 3% och respektive 2%. Eftersom för höga nivåer av kalium och klorid kan leda till allvarliga driftproblem i sodapannan kommer bruket sannolikt att behöva en dedikerad process för selektiv borttagning av K och Cl från ESP-stoftet, t ex lakning, omkristallisering eller jonbyte för att kunna minska på kalium- och kloridhalterna.



Figur 8. Sammansättningen av ESP-stoft i alla tre simulerade fallen.

Vidare undersöktes även effekterna på den ekonomiska aspekten. I Tabell 6 visas den totala kostnaden för konsumtionen av koldioxid, svavelsyra och make-up av natriumhydroxid i varje fall. I den här analysen har vi utgått från att svavelsyra och natriumhydroxid kostar 113 [EUR/ton] respektive 550 [EUR/ton]. Koldioxid antas kosta ungefär 100 [EUR/ton], vilket är mer än state-of-the-art-kostnader för koldioxidinfångning beräknade inom tidigare studier (58 [EUR/ton], Skagestad *et al.* 2018), men i linje med kostnader för inköp av kommersiellt CO₂ med hög renhet från t ex livsmedelsindustrin, och förmodligen närmare de faktiska infångningskostnader år 2025. Enligt resultatet i tabellen går det att observera att den totala kostnaden är den högsta när det enbart tillsätts svavelsyra till talloljekokeriet. Det visade sig också att det är möjligt att göra ekonomiska besparingar genom att ersätta en del av svavelsyran mot koldioxid till talloljekokeriet. Även när bara 40% av massflödet av svavelsyra har ersatts är besparingen tydlig.

De ekonomiska besparingarna tack vare lägre kemikalie- och makeupkostnader måste dock vägas emot eventuella andra kostnader förutom en investering i en koldioxidhantering. Exempelvis måste en möjlig investering av askreningsprocess tas in åtanke om den inte redan finns inom massabruket. Till detta krävs det också att inkludera processens driftkostnader i beräkningen, vilket betyder att det krävs en ytterligare utredning för att kunna bestämma den verkliga effekten på ekonomin. Vidare kräver det säkerligen mer arbete för att utreda ett möjligt optimum av koldioxidtillsatsen till talloljekokeriet som gynnar både massabruket och dess ekonomi.

Tabell 6. Kostnader för koldioxid, svavelsyra och natriumhydroxid.

Fall	Koldioxid [EUR/ADt]	Svavelsyra [EUR/ADt]	NaOH make-up [EUR/ADt]	Totalt [EUR/ADt]
1	0	1.05	14.4	15.50
2	0	1.51	15.3	16.8
3	0.54	1.09	12.67	14.3

Ett intressant fall för fortsatt arbete som tyvärr inte fick plats i denna studie skulle vara att kombinera användning av koldioxid och natriumsesquisulfat (restsyran) i talloljetillverkning. Leverantörer till tvåstegssurgörningen (Air Liquide 2025) verkar inte erbjuda en sådan möjlighet utan levererar paketerade lösningar där CO₂ endast kan kombineras med ren H₂SO₄. Det är oklart huruvida en tvåstegssurgörning med CO₂ först och Na₃H(SO₄)₂ i andra steget är tekniskt möjlig och ger talloljan av godtagbar kvalitet, men skulle annars kunna innebära ännu större ekonomiska fördelar då sesquisulfatet är oftast tillgängligt utan extra kostnad.

6 Slutsatser och fortsatt arbete

Ett typiskt massabruk släpper ut signifikanta mängder av biogen koldioxid. För att uppnå klimatneutralitet i världen kommer även biogena CO₂-utsläpp att behöva infångas i framtiden för att kompensera för de tidigare, samt de än så länge nödvändiga, fossila utsläppen. Koldioxidinfångning i massabruk börjar därför bli ett alltmer accepterat koncept och även om ingen storskalig, kommersiell installation har byggts än så länge finns det ett antal lovande pilotprojekt.

Det finns tre betydande punktkällor för CO₂ i ett typiskt massabruk: sodapannan, mesaugnen och barkpannan. Sodapannan är med råge den största av de tre men att fånga utsläppen från mesaugnen är den lägst hängande frukten då CO₂-koncentrationen i avgaserna är högst (CO₂ kommer inte bara från bränsleförbränningen utan även från kalcineringsreaktionen). Specifika CO₂-utsläpp från en typisk mesaugn varierar något, men ett rimligt medelvärde kan antas till 340 kg CO₂/ADt. För ett massabruk med en ungefärlig produktion av 500 000 ADt/år blir denna siffra ungefär 170 kton CO₂/år.

Relevanta infångningstekniker för denna mängd CO₂ ligger således inom ett intervall 10–300 kton CO₂ per år och för skrivande stund finns det ett antal intressanta lösningar, inklusive kemisk och fysisk absorption, adsorption på fasta sorbenter, membran- och kryogenseparation osv. Samtidigt finns det ett antal viktiga aspekter som måste tas i beaktan vid valet av en teknisk lösning som är lämplig för ett specifikt massabruk. Då många fabriker är begränsade m a p fysisk yta bör koldioxidinfångningsanläggningen vara liten och kompakt, gärna modulär och/eller stapelbar. En modulär lösning har också fördelen att den kan byggas i en liten skala och expanderas vid behov, vilket minskar de initiala investeringskostnaderna. Dyra material för system med höga korrosionskrav, specifik energikonsumtion för enheten samt möjligheten att integrera med brukets befintliga processer är andra viktiga aspekter, såsom krav på förbehandling av rökgasen före CO₂-avskiljning (kylning, komprimering, svavelborttagning osv.) och slutprodukten egenskaper (främst renheten). Samtidigt bör avskiljningen baseras på en relativt väletablerad och robust teknik med enkel drift och servicemöjligheter.

Utifrån dessa förutsättningar verkar främst två tekniker kunna rekommenderas för småskalig koldioxidinfångning som studerats i detta projekt: aminabsorption samt membranseparering. Amintekniker är väletablerade och det finns ett tillfredställande antal projekt med både teoretiska och praktiska erfarenheter från industriella tillämpningar; ett flertal leverantörer erbjuder både standard och skräddarsydda anläggningar. Aminabsorption går också att köras i en relativt liten skala, vilket kan vara lämplig för en mesaugn. Membranbaserade lösningar är, å andra sidan, mycket flexibla i storlek och kan både staplas och byggas på vid behov. De kräver ingen komplicerad förbehandling och inga extra kemikalier, däremot höga tryck vilket måste räknas in i energibalansen. Då separeringsprincipen bygger på att membranet släpper igenom CO₂ effektivare än andra gaser (men inte 100% selektivt) behövs ofta flera kaskaderade enheter för att uppnå hög renhet. För flera av de applikationerna som föreslås i denna rapport, är dock hög renhet troligen inte avgörande och då kan membran vara ett fullt

tillfredställande val. Membrantillämpningar är också på stark framväxt där nya, förbättrade lösningar dyker upp, t ex membraner med funktionaliserade ytor med högre selektivitet eller lägre krav på inkommande tryck. Utvecklingen inom denna bransch bör därför följas noga.

Parallellt med undersökning av lämpliga tekniker för koldioxidinfångning har vi även studerat möjligheter till intern användning av den infångade CO₂ i massabruket. Det finns ett antal väletablerade, och ett vidare antal potentiella, processer där CO₂ skulle kunna göra nytta. De flesta tillämpningar drar nytta av koldioxidens potential att sänka pH i vattenlösningar i kombination med dess buffrande kapacitet, vilket gör processer mildare och mer kontrollerbara. Till de mer etablerade hör pH-justering i talloljekokeriet, neutralisering i fiberlinjen, pH-justering inom nära-neutral blekning och användning av CO₂ som hjälpmedel i massatvätt. Ett antal leverantörer erbjuder dessa lösningar och de verkar fungera bra, även om leverantörerna är mycket sparsamma med information till icke-kunder och direkt feedback är svår att hitta.

Det finns även ett antal mindre kända processer i massabruket där CO₂ skulle kunna användas. Ligninfällning är förmodligen den mest uppenbara då intresset inom att separera lignin för att både öka brukets koleffektivitet samt ta fram en ny produkt stiger kraftigt. Justering av pH vid asklakning, strippning av grönlut för att producera intern H₂SO₄ och alkali samt produktion av elektrobränsle har också nämnts men det finns ingen detaljerad information om nutidens faktiska applikationer. Dessa är dock värda att hålla i åtanke för framtiden, då krav på minskade utsläpp (av t ex utstött ESP-aska) eller högre resiliens inom kemikalieförsörjning kan ändra de ekonomiska förutsättningarna.

Den större investeringen och osäkerheten ligger på insamling av CO₂, snarare än själva användningen då den är ofta rätt simpel att integrera i befintlig processutrustning och layout för de tekniker som bara innebär optimering och effektivisering av befintliga processer enligt Tabell 4. Användning av CO₂ i dessa tekniker verkar dessutom på ett enkelt sätt kunna leda till betydande prestandaförbättringar. Efter att ha analyserat behovet för CO₂ för interna processer har vi dock konstaterat att detta är mycket litet jämfört med brukets potential att fånga in CO₂. De redovisade processerna, dimensionerade för en rimlig kapacitet, verkar kräva runt 30-75 kg CO₂/ADt sammanlagt, vilket är mindre än 30% av mängden tillgänglig från mesaugnen (över 300 kg CO₂/ADt). Detta betyder att även vid en måttlig infångningseffektivitet kommer bruket ha ett överskott CO₂. Detta leder till en slutsats att två rätt skilda lösningar kan rekommenderas för ett typiskt massabruk:

1. Liten infångning av just-in-time-typ, där CO₂ fångas in, konditioneras och skickas direkt till de behövande processerna. Ett sådant system kräver ingen eller minimal lagringskapacitet, t ex i en form av ett ballonglager (dvs. ej trycksatt), och kan åstadkommas med relativt låga investeringskostnader. Den är dock tyvärr känslig för processtörningar. En sådan lösning kan med fördel använda småskaliga, modulära infångningstekniker samt skicka CO₂ till processer med något lägre renhetskrav, t ex ligninfällning.

2. Fullskalig infångning med rening, förvätskning och lagring, där mindre mängd CO₂ används internt medan resten kan säljas, exporteras till andra bruk eller skickas till slutlagring. För en sådan lösning kommer investeringskostnader förstås vara mycket högre, inte minst för en förvätskningsanläggning. Fördelen kommer dock vara ett robust system med ett ordentligt CO₂-lager och ren produkt, samt möjligheter till att exportera CO₂ vilket i framtiden kan sannolikt generera extra inkomster.

För ett massabruk som överväger att investera i koldioxidinfångning är givetvis option 2 är att föredra. Trenderna verkar peka åt växande marknad för koldioxidhandel, särskilt biogen, och det är inte helt osannolikt att i framtiden kommer infångningen från lättillgängliga källor bli en standard, eller to o m ett krav. En fullskalig anläggning som producerar ren CO₂ i vätskeform har en potential att förse bruket med CO₂ för interna behov, men ger även en möjlighet att sälja produkten vidare och således bli en extra inkomstkälla.

Om denna investering är för stort föreslår vi ett litet infångningssystem där små mängder kan infångas till relativt låg kostnad och där hundra procentig renhet inte är nödvändigt. Det är däremot viktigt att detta system är planerat på ett sådant sätt som tillåter framtida utbyggnad och expansion både när det gäller produktvolym, kvalitet (renhet) om möjligheter till vidarebearbetning (förvätskning, lagring). Ett modulärt system, t ex membranbaserat, är sannolikt den bästa lösningen.

6.1 FORTSATT ARBETE

Inom fortsatt arbete skulle vi först och främst rekommendera en noga övervakning av utveckling kring koldioxidinfångning och dess applikationer. Nya tekniska lösningar, t ex i form av förbättrade aminlösningar med högre effektivitet eller kemisk/termisk stabilitet, eller funktionaliserade material för koldioxidinfångning i form av t ex metallorganiska ramverk (KVA 2025) dyker upp praktiskt taget varje dag vilket gör att denna rapport kan snabbt vara i behov av uppdatering. De nya lösningarna kan göra processer för koldioxidinfångning både billigare, mer flexibla när det gäller t ex skalan, och enklare att installera på ett massabruk.

Funktionaliserade membraner som kräver mindre tryck eller absorption i smälta salter med effektiv värmeintegrering är andra exempel på intressanta processer för framtiden.

Ett kompletterande arbete med fördjupade simuleringar och systemanalys kan också rekommenderas. CO₂-tillämpningar inom fiberlinjen, där både kemikaliekonsumtion, tvätteffektiviteter och vattenanvändning förändras är komplexa och har därför lämnats utanför detta arbete, men analysen är viktig för att få en samlad bild av vinsterna och resultaten är värdefulla för bruk som överväger dessa processförändringar. Även olika grader av energiintegrering mellan en koldioxidinfångningsanläggning och bruket samt påverkan på ång- och elproduktion är intressanta att utforska. Dessa resultat kan sedan användas som bas till en fördjupad teknoekonomisk analys samt LCA-studier.

7 Referenslista

- Advanced Carbons Council.** (2025, 10 februari). Bright Renewables to build Carbon Capture Plant with CO₂ Liquefaction for EnergieWerk Ilg in Dornbirn, Austria. <https://advancedcarbonscouncil.org/blogpost/2151389/507766/>
- Air Liquide.** (n.d.). Massa- och pappersindustrin. Hämtad 16 juni 2025 från <https://se.airliquide.com/din-bransch/massa-och-papperstillverkning>
- Alves, C. A. C., & de Oliveira Araújo, A. M. E. O.** (2017). *Selective removal of K⁺ and Cl⁻ from recovery boiler electrostatic precipitator ashes in a kraft process* (European Patent Application No. EP3228743A1). European Patent Office.
- Andritz.** (2025). LigniOx® processinfo. Hämtad 21 juli 2025 från <https://www.andritz.com/products-en/pulp-and-paper/pulp-production/kraft-pulp/chemical-recovery/ligniox-lignin-recovery>
- Aqualung.** (n.d.). Hämtad 27 juni 2025 från <https://aqualung-cc.com/>
- Audet, A., Mishra, S. P., Sherson, G., & Earl, P. F.** (2014, oktober). Near-neutral brightening: Mill implementation of a novel bleaching strategy [Konferenspresentation]. *International Pulp Bleaching Conference (IPBC 2014)*, Grenoble, Frankrike.
- Energigas Sverige.** (n.d.). Karta biogasanläggningar. Hämtad 30 juni 2025 från <https://www.energigas.se/fakta-om-gas/biogas/karta-biogasanlaggningar/>
- Energimyndigheten.** (2019). *Integrering av elektrobränslekonceptet i massa- och pappersindustrin för ett framtida elnät i balans och ett hållbart energisystem med minimala klimatavtryck* (Slutrapport). https://www.energimyndigheten.se/forskning-och-innovation/projektdatabas/sokresultat/GetDocument/?id=bc23d239-ebc2-4c36-b890-156139e00de8&documentName=SLUTRAPPORT_inskickad%20till%20EM29%20mars%202019.docx.pdf
- Girard, R., Ho, C., Guthrie, P., & Campbell, P.** (1999). Effects of carbon dioxide on the efficiency of various brown stock washers [Konferensartikel]. *TAPPI Pulping Conference*.
- Gonçalves, C., Tran, H., & Shenassa, R.** (2007, 29 maj–1 juni). Factors affecting chloride and potassium removal efficiency of a recovery boiler precipitator ash treatment system [Konferensartikel]. *International Chemical Recovery Conference (ICRC)*, Québec City, Kanada. <https://utoronto.scholaris.ca/server/api/core/bitstreams/43ca815f-8ab6-4ca9-95f9-2f2750177385/content>
- Han, J. S., Kang, D. S., & Seo, Y. B.** (2021). Application of In Situ Calcium Carbonate Process for Producing Papermaking Fillers from Lime Mud. *ACS Omega*, 6(5), 3884–3890. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05688>

- Hart, P. W., Lindström, M. E., Colson, G. W., & Wiley, G. M. (2010). Nonprocess-element control in the liquor cycle using an ash leaching system. *TAPPI Journal*, 9(7), 7–13.
- Jannasch, A.-K., Hjalmar Pihl, H., Wolf, J., Lindström, R., Ahlroth, M., Schönström, J., Pellin, K., Isaksson, J., Rudén, L., Hermansson, S (2019) Integration of the electro-fuel concept in pulp and paper industry for a future electricity system in balance and a sustainable energy system with minimal carbon foot print, Energimyndigheten rapport 2017-010504, projektnummer 45121-1.
- Kalliola, A., Liitiä, T., Winberg, I., Kemppainen, K., Poukka, O., Davin, J., Wikberg, H., Vandezande, P., Sjögård, P., Pehu-Lehtonen, L. (2022). LigniOx Process Concept to Produce Lignin Dispersants at a Kraft Pulp Mill and an Organosolv Biorefinery. *Proceedings of The 10th Nordic Wood Biorefinery Conference*, 25-27 October 2022, Helsinki, Finland, 124-130.
- Karjalainen, T. (2024, 12 december). Progress in use of captured CO₂ expected soon. <https://forest.fi/article/captured-co2/>
- Kouisni, L., Holt-Hindle, P., Maki K., Paleologou, M. (2012). The Lignoforce System™: A New Process for the Production of High-Quality Lignin from Black Liquor *Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes: VOL.2, NO.4, 2012*, 6-10.
- Kruger Inc. (2024, 1 november). Kruger to implement a demonstration project for carbon capture and reuse at its Wayagamack Mill [Pressmeddelande]. <https://www.kruger.com/news/kruger-to-implement-a-demonstration-project-for-carbon-capture-and-reuse-at-its-wayagamack-mill/>
- Kuparinen, K., Vakkilainen, E., & Tynjälä, T. (2019). Biomass-based carbon capture and utilization in kraft pulp mills. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24, 1213–1230. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9833-9>
- KVA, Kungliga Vetenskapsakademin (2025) Nobelpriset i kemi 2025: Deras molekylära arkitektur har stor plats för kemi, pressmeddelande, hämtad 9 oktober 2025 från <https://www.kva.se/nyheter/nobelpriset-i-kemi-2025/>
- Lachapelle, R. C. (1992). Process for preparing a paper pulp using carbon dioxide as an acidifying agent for a bleached pulp (U.S. Patent No. 5,139,613). U.S. Patent and Trademark Office.
- Lake, M. A. , Blackburn, J. C. (2014). SLRP™ – an Innovative Lignin-Recovery Technology. *Cellulose Chem. Technol.*, 48 (9-10), 799-804
- Lefvert, A., & Grönkvist, S. (2023). Smarter ways to capture carbon dioxide – exploring alternatives for small to medium-scale carbon capture in kraft pulp mills. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 127, 103934.
- Lindström, V. (2023). *Capture and utilization of carbon dioxide from the lime kilns of a Kraft pulp mill for bio-methanol production: Case study at the market pulp mill Södra Cell Mönsterås* (Examensarbete för masterexamen, Chalmers Tekniska Högskola, Inst. För Rymd-, geo och miljövetenskap).

Lovell, A., Hoffstedt, C., Berglin, N., & Nordgren, D. (2011). *State-of-the-art technologies for recovery of chemicals and energy in the kraft pulp mill 2010* (Innventia Report No. 149, Energy & Biofuels research programme). Innventia AB.

Liquid Wind. (n.d.). Företagsinformation och processbeskrivning. Hämtad 27 januari 2025 från <https://www.liquidwind.com/>

LULUCF (2018) Regulation (EU) 2018/841 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on the inclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry in the 2030 climate and energy framework, and amending Regulation (EU) No 525/2013 and Decision No 529/2013/EU, hämtad 6 oktober 2025 från <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02018R0841-20230511>

Mante, N. O. & Jacobsen, A. (2024, 22 februari). Decarbonizing paper packaging. <https://www.amazon.science/blog/decarbonizing-paper-packaging>

Mantel. (2024). *Is zero the new minimum for CO₂ capture?* [White paper]. <https://mantelcapture.com/wp-content/uploads/2024/07/Mantel-Capture-Inc.-Whitepaper-Is-Zero-the-New-Minimum-for-CO2-Capture.pdf>

Mitsubishi Heavy Industries. (2024, 29 november). Launch of demonstration test for CO₂ capture from chemical recovery boilers at paper mills in Japan – using CO₂MPACT™ Mobile to contribute to the decarbonization of the pulp and paper industry – [Pressmeddelande]. <https://www.mhi.com/news/24112901.html>

Nanri, Y., Konno, H., Goto, H., & Takahashi, K. (2008). A new process to produce high-quality PCC by the causticizing process in a kraft pulp mill. *TAPPI Journal*, 19–24.

Noram. (2025). LignoForce® processinfo. Hämtad 21 juli 2025 från <https://noram-intl.com/sv/lignoforce/>

OLI (2025). OLI Studio info och översikt, OLI Systems, hämtad 9 oktober 2025 från <https://www.olisystems.com/software/oli-studio/>

Preem. (2019). "Tallolja i tanken gör skillnad för klimatet". Hämtad 14 februari 2025 från <https://www.preem.se/om-preem/insikt-kunskap/2019/tallolja-i-tanken-gor-skillnad-for-klimatet/>

Matthis, S. (2022, 4 april). Finnpulp abandons mill project in Kuopio. *PulPaper News*. Hämtad 25 februari 2025 från <https://www.pulpapernews.com/20220404/13423/finnpulp-abandons-mill-project-kuopio>

Matthis, S. (2025, 7 februari). Svante developing world-first carbon capture and storage project at Arkansas pulp mill. *PulPaper News*. Hämtad 27 juni 2025 från <https://www.pulpapernews.com/20250207/16397/svante-developing-world-first-carbon-capture-and-storage-project-pulp-mill-arkansas>

Park, J. W., Heo, S., Yeo, J.-G., Lee, S., Kim, J.-K., & Lee, J. H. (2025). Membrane-Based CO₂ Capture Across Industrial Sectors: Process Conditions, Case Studies, and Implementation Insights. *Membranes*, 15(7), 200, <https://doi.org/10.3390/membranes15070200>

Radiotis, T., Audet, A., Lee, C.-L., Subilia, M., McCauley, J., Kreckel, C., & Hoh, B. (2018, 28–31 oktober). Implementation of the near-neutral chlorine dioxide brightening technology at Domtar Johnsonburg Mill [Konferensartikel]. I *Proceedings of the 2018 TAPPI PEERS Conference*, Portland, OR, USA.

RED III (2023)Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652, hämtad 6 oktober 2025 från <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj/eng>

Romantschuk, H. W., & Vuojolainen, T. J. (1977). Process for separating sulphur in the form of hydrogen sulphide from clarified green liquor obtained from the combustion of waste liquor (U.S. Patent No. 4,049,787). U.S. Patent and Trademark Office.

Skagestad, R., Wolf, J., Anheden, M., Gardarsdottir, S., Norrmann, F., (2018) A Case Study of Partial Capture of CO₂ From a Pulp Mill – The CO₂ Capture Cost, 14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-14, 21 - 25 October 2018, Melbourne, Australia

Skoglund, H., Fu, C., Harvey, S., & Svensson, E. (2023). Integration of carbon capture in a pulp mill – effect of strategic development towards better biomass resource utilization. *Frontiers in Thermal Engineering*, 3, 1282028. <https://doi.org/10.3389/ftther.2023.1282028>

SLB. (2024, 1 augusti). SLB and Aker Carbon Capture joint venture awarded FEED contract by CO₂80 for large-scale carbon removal project [Pressmeddelande]. <https://www.slb.com/news-and-insights/newsroom/press-release/2024/slb-and-aker-joint-venture-awarded-feed-contract-by-co280-for-large-scale-carbon-removal-project>

Spendrups. (2020, 17 november). Lilla Globen i Grängesberg. <https://www.spendrups.se/media/nyheter/investering-i-biogasanlaggning-hjalper-oss-ta-tillvara-energin-fran-avloppsvatten/>

Starrsjö, S. (2021). *On the process development of an ECF light bleaching sequence for the production of high quality softwood kraft pulp and low AOX formation* (Licentiatavhandling, Mittuniversitetet, Sundsvall).

Stora Enso. (2024, 28 april). Infångning av kol vid Stora Ensos Skutskär Bruk – på väg mot en klimatpositiv produktion [Pressmeddelande]. <https://www.storaenso.com/sv-se/newsroom/news/2024/4/capturing-carbon-skutskar-mill>

Södra. (2023, 6 mars). Södra i internationell storsatsning på koldioxidinfångning [Pressmeddelande]. <https://www.sodra.com/sv/se/skog-medlem/aktuellt/sodrakontakt/nyhetsartiklar/2023/nummer-1/sodra-i-internationell-storsatsning-pa-koldioxidinfangning/>

Södra. (2025, 6 november). Södra testar teknik för koldioxidinfångning i Värö [Pressmeddelande]. <https://www.sodra.com/sv/se/press-och-media/pressmeddelanden/sodra-testar-teknik-for-koldioxidinfangning-i-varo/>

Tall Oil Community (2025, 18 april). Tallolja – processbeskrivning, <https://talloilcommunity.com/tallolja/>.

Tikka, P. (2008). *Chemical pulping. Part 2, Recovery of chemicals and energy* (Kap. 8: Soap and Tall Oil). Paperi ja Puu Oy.

Valmet. (2018). Production of Sulfuric Acid from Incineration of Pulp Mill Non-Condensable Gases – a Biorefinery Concept, White paper. Hämtad 3 oktober 2025 från https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/power-and-recovery/sulfuric_acid_from_pulp_mill_ncg_whitepaper.pdf

Valmet. (2025). Lignoboost® processinfo. Hämtad 21 juli 2025 från <https://www.valmet.com/pulp/other-value-adding-processes/lignin-extraction/lignoboost-process/>

Välimäki, E. J., & Sirén, K. B. (2015). A new process for removing sulphur, potassium, and chlorine from the pulp mill. *Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes*, 3(3).

Välimäki, E. J., Sirén, K. B., & Hamaguchi, M. (2015). Simultaneous control of sulfur and non-process elements. *O Papel*, 76(7), 59–64.

Ytti, L. (2024). *Evaluation of carbon capture technologies and integration into a pulp mill in Finland* (Examensarbete för masterexamen, Lappeenranta–Lahti University of Technology).

CCU FÖR INTERN CO₂-ANVÄNDNING I ETT MODERNT MASSABRUK

Att minska inte bara de fossila, utan även de biogena koldioxidutsläppen har på senare tid blivit intressant som ett sätt att bekämpa klimatförändringarna. Sulfatmassabruk, med sina stora och koncentrerade utsläpp, har identifierats som en särskilt lämplig kandidat för koldioxidinfångning. Det finns dessutom ett antal processer inom sulfatmassaframställning där CO kan användas för att förbättra brukets processer. Denna rapport redovisar ett antal småskaliga (10–300 kton CO per år) tekniker för koldioxidinfångning lämpliga för rökgaserna från massabrukets mesaugn. Samtidigt presenteras ett antal interna processer där användning av koldioxid kan leda till förbättrad prestanda, minskad kemikalieförbrukning och lägre miljöpåverkan (talloljekokeriet, brunmassatvätt, blekning nära neutrala förhållande, neutralisering och asklakning) eller till nya produkter (ligninfällning, grönlutsstrippning eller elektrobränsletillverkning). Den totala mängden koldioxid som skulle behövas för interna processer är däremot mycket mindre än CO₂ tillgänglig från mesaugnen. Bruken kan därför rekommenderas att antingen installera en komplett anläggning för CO₂-infångning med möjlighet till att förvätska och sälja CO₂, eller ett mindre-just-in-time-infångningssystem med möjligheten till framtida expansion.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.

