

Ökad integration skog-industri med digitala egenskapsdeklarationer av rundved och flis

SLUTRAPPORT FÖR PROJEKTET "FÖRBÄTTRADE PROCESSER OCH PRODUKTER GENOM DIGITALISERING AV SKOGLIGA VÄRDEKEDJOR" (DIGICHAIN)



FOTO: MARIA NORDSTRÖM/SKOGFORSK

Ökad integration skog-industri med digitala egenskapsdeklarationer av rundved och flis

SLUTRAPPORT FÖR PROJEKTET "FÖRBÄTTRADE PROCESSER OCH PRODUKTER GENOM DIGITALISERING AV SKOGLIGA VÄRDEKEDJOR" (DIGICHAIN)

Greater forest-industry integration through digital declarations of roundwood and chip properties

FINAL REPORT OF THE PROJECT "IMPROVED PROCESSES AND PRODUCTS THROUGH DIGITALISATION OF FOREST VALUE CHAINS" (DIGICHAIN).



Uppsala Science Park, 751 83 Uppsala
skogforsk@skogforsk.se
skogforsk.se

Redaktör: Anna Franck, anna@annafranck.se
©Skogforsk 2020 ISSN 1404-305X

Förord

Den här rapporten utgör slutrapportering för projektet "Förbättrade processer och produkter genom digitalisering av skogliga värdekedjor" (DigiChain) som pågick från augusti 2018 till juli 2020. Projektet har varit ett samarbete mellan Skogforsk (projektledare), RISE, Holmen, Sveaskog, SCA och Biometria och finansierades av det strategiska innovationsprogrammet PiiA (Processindustriell IT och Automation) tillsammans med projektparterna.

Vi vill rikta ett stort och varmt tack till alla som medverkat till att göra projektet intressant och framgångsrikt genom värdefulla inspel och stort engagemang. Ett särskilt omnämmande och tack för gott samarbete till Fredrik Rajala, Mattias Forsberg och Christer Ranvald från Sveaskog; Jonas Eriksson, David Runosson, Hannes Vomhoff, Christer Söderberg och kollegorna på Iggesunds bruk från Holmen; Henrik Sjölander, Maria Boman, Per Österberg och kollegorna på Munksund och Bollsta sågverk från SCA samt Tanja Keisu och Sven Jägbrant från Biometria.

Uppsala i augusti 2020,

Maria Nordström (projektledare)

Innehåll

Förord.....	3
Summary.....	6
Sammanfattning.....	7
Inledning.....	8
Bakgrund.....	8
Information om den skogliga råvaran vid industrin.....	8
Information om den skogliga råvaran i skog och på väg till industri.....	9
Spårbarhet och identitetskoppling mellan skog och industri.....	10
Material och metoder.....	11
Dataunderlag.....	11
Skördardata.....	11
Data från skogliga register.....	13
Inmättningsdata.....	13
Röntgendata.....	13
Beräkning av egenskaper hos massaved.....	14
Beräkning av egenskaper hos sågverksflis.....	15
Alternativ A: Modell för beräkning av egenskaper hos sågverksflis baserad på skördardata och beståndsalder.....	15
Alternativ B: Modeller för skattning av flisegenskaper från mätramsdata – modellering av densitet från röntgendata.....	20
Modeller för simulering av massabrukets vedflöde.....	22
Vedgården.....	23
Flisstackar.....	23
Prognos produktens egenskaper.....	25
Resultat och diskussion del I: Utfall av fallstudierna.....	26
Fallstudie I: SCA Östrand.....	27
Vedflöden till Östrand.....	27
Simulering av arkegenskaper.....	30
Simulering av ved av olika averkningstyp.....	31
Simulering av sågverksflis.....	33
Simulering av flisstacken.....	35
Fallstudie II: SCA Bollsta.....	36
Skattade variationer i fiberegenskaper hos sågverksflis baserat på stocktyp.....	36
Fallstudie III: Holmen Iggesund.....	40
Vedflöden till Iggesund.....	40

Resultat och diskussion del 2: Demonstration av digitala egenskapsdeklarationer i två systemmiljöer.....	42
Demonstrator A: Biometria och Holmen.....	42
Uppbyggnad av demonstratorn.....	42
Erfarenheter från testkörning och koppling mot data från industrin.....	45
Demonstrator B: Sveaskog.....	47
Uppbyggnad av demonstratorn.....	47
Erfarenheter och fortsatt arbete.....	47
Möjligheter och utmaningar med egenskapsstyrning.....	48
Sågverksflis.....	48
Massaved.....	50
Timmer.....	51
Slutsatser.....	53
Referenser.....	54

Summary

It is well known that the properties of wood raw materials, such as density and fibre dimensions, affect the properties of the pulp and thereby the end products. It has also been described how these properties can be modelled on the basis of forest variables like tree species, stand age, geographical position of the site, tree dimensions, and position of the logs in the stems. These models have not yet been implemented in practice, partly because input data have not been available on a large scale.

However, today's production reports from harvesters, where each individual log is described in detail, create new opportunities to combine these data with forest registers, and run property models on a large scale. The increased use of advanced measurement technology in industry, such as X-rays, opens up for a larger-scale validation of the models, thereby enabling a system for digital declarations of properties.

The aim of the project "*Improved processes and products through digitalisation of forest value chains*" (DigiChain) described in this report was to demonstrate and examine the value of digital declarations of properties of pulpwood and sawmill residues for the pulp and paper industry. The project was based on four case studies: SCA Östrand (pulpwood), SCA Bollsta (sawmill residues), Holmen Iggesund (pulpwood and sawmill residues), and SCA Munksund (timber); the first three are presented in this report.

Data were collected from harvesters and forest registers, to capture the variation in wood and fibre properties of the raw materials supplied to the participating pulpmills over a longer time period. Simulations of the raw material's movement through woodyards and chip piles show how differences in properties are propagated in the process.

The following main conclusions were drawn from the project:

- Property declarations are feasible, and could become a key tool for resource-efficient and profitable integration of forest and industry in the future. However, this requires a sector-wide standard, to communicate property declarations in such a way that all actors can interpret and benefit from the content, and share information with each other.
- Wood and fibre properties in timber and pulpwood can be estimated using existing models on the basis of production data from harvesters, supplemented with age information from forest registers. A system for declarations of properties requires further development of a digital infrastructure for structuring and filtering the data that are needed for the calculations.
- Wood and fibre properties in sawmill residues can be estimated using a model to divide up the log volume into an outer and an inner part, based on harvester information and age data. Estimations of dry density of sawmill residues, based on aggregated information from conventional X-ray measurement frames, such as average value for the log or similar, are regarded as being so uncertain that they are currently not suitable for sorting residues.
- Raw material properties vary greatly, so it would be valuable to look further into how information about this variation could be used to improve efficiency and quality in processes and end products.
- Usable relationships can be found between data on fibre properties of the raw material and measurements in, particularly, early process stages in the pulp process. These relationships have not previously been established using production data.

Sammanfattning

Att råvarans egenskaper som till exempel vedens densitet och fibrernas dimensioner har betydelse för massans, och därmed slutprodukternas, egenskaper är välkänt sedan länge. Det finns dessutom beskrivet hur dessa egenskaper kan modelleras utifrån skogliga variabler som trädslag, beståndsålder, växtplatsens geografiska position, trädens dimensioner och stockarnas läge i stammarna. Att dessa modeller ännu inte kommit i praktisk användning beror till del på att indata till modellerna inte funnits tillgängliga i större skala. Dagens produktionsrapportering från skördaren där varje enskild stock beskrivs detaljerat skapar dock nya möjligheter att kombinera dessa data med skogliga register och köra egenskapsmodellerna i stor skala. Den ökande användningen av avancerad mätteknik som röntgen i industrin öppnar för en mer storskalig validering av modellerna och möjliggör därmed ett system för digitala egenskapsdeklarationer.

Projektet "Förbättrade processer och produkter genom digitalisering av skogliga värdekedjor" (DigiChain) som beskrivs i den här rapporten syftade till att demonstrera och undersöka nyttan av digitala egenskapsdeklarationer av massaved och sågverksflis för massa- och pappersindustrin. Projektet byggdes kring fyra fallstudier: SCA Östrand (massaved), SCA Bollsta (sågverksflis), Holmen Iggesund (massaved och sågverksflis) samt SCA Munksund (timmer) där de tre första redovisas i den här rapporten.

Inom projektet samlades data från skördare och skogliga register för att beskriva variationen i ved- och fiberegenskaper till de deltagande massabruken under en längre tidsperiod. Simuleringar av råvarans rörelse genom vedgård och i flisstackar visar hur skillnader i råvarans egenskaper fortplantas in i processen.

Från projektet drogs följande huvudsakliga slutsatser:

- Egenskapsdeklarationer är möjliga att åstadkomma och kan komma att bli ett centralt verktyg för resurseffektiv och lönsam integration av skog och industri framöver. Det finns dock behov av en branschgemensam standard för att kommunicera egenskapsdeklarationer så att alla aktörer kan tolka och dra nytta av innehållet samt utbyta information mellan varandra.
- Skattning av ved- och fiberegenskaper i timmer och massaved kan göras med befintliga modeller utifrån produktionsdata från skördare kompletterat med åldersuppgifter från skogliga register. Centralt för att bygga ett system för egenskapsdeklarationer är att bygga vidare på den digitala infrastrukturen för att strukturera och filtrera de data som behövs för beräkningarna.
- Skattning av ved- och fiberegenskaper i sågverksflis kan göras genom en modell för att dela upp stockens volym i en yttre och en inre del baserat på skördarinformation och åldersuppgifter. Skattningar av sågverksflisens torrdensitet som baseras på aggregerad information från konventionella röntgenmätningar, så som stockmedelvärden eller liknande, bedöms vara så pass osäkra att de för närvarande inte lämpar sig för flissortering.
- Råvarans egenskaper varierar i tillräckligt stor utsträckning för att det ska vara värdefullt att gå vidare med att undersöka hur information om denna variation kan utnyttjas för högre effektivitet och kvalitet i processer och slutprodukter.
- Det går att etablera användbara samband mellan data om råvarans fiberegenskaper och mätningar i framförallt tidiga processteg i massaprocessen. Att etablera sådana samband baserat på produktionsdata har inte gjorts tidigare.

Inledning

Den här rapporten utgör slutrapportering för projektet "Förbättrade processer och produkter genom digitalisering av skogliga värdekedjor" (DigiChain). Syftet med projektet var att demonstrera och undersöka nyttan av digitala egenskapsdeklarationer av massaved och sågverksflis för massa- och pappersindustrin. Projektet byggdes kring fyra fallstudier: SCA Östrand (massaved), SCA Bollsta (sågverksflis), Holmen Iggesund (massaved och sågverksflis) samt SCA Munksund (timmer). Resultaten från Munksund är mer riktade mot möjliga tillämpningar av egenskapsdeklarationer för sågverk och redovisas i en separat rapport (Möller m.fl. opubl. b).

Bakgrund

INFORMATION OM DEN SKOGLIGA RÅVARAN VID INDUSTRIEN

Att råvarans egenskaper som till exempel vedens densitet och fibrernas dimensioner har betydelse för massans, och därmed slutprodukternas, egenskaper är välkänt sedan länge (till exempel Ericson m.fl. 1973, Kocurek & Stevens 1983, Hartler 1986). I ett samarbete mellan Skogforsk och dåvarande STFI (nu del av RISE) togs därför modeller fram för att utifrån skogliga variabler som trädslag, beståndsålder, växtplatsens geografiska position, trädens dimensioner och stockarnas läge i stammarna beskriva relevanta ved- och fiberegenskaper (Wilhelmsson m.fl. 2002; Ekenstedt m.fl. 2003; Wilhelmsson 2005). Sambanden fungerar väl för att beskriva egenskaperna på partinivå, men avvikelserna på enskild stam/stock kan vara betydande. Att dessa modeller ännu inte kommit i praktisk användning beror till del på att indata till modellerna inte funnits tillgängliga i större skala. Dagens produktionsrapportering från skördaren, där varje enskild stock beskrivs detaljerat, skapar dock nya möjligheter att kombinera dessa data med skogliga register och köra egenskapsmodellerna i stor skala.

En utmaning för massa- och pappersindustrin är den sammanblandning av råvara från olika leveranser som ofta sker i samband med hantering av massaved i stora vältor på vedgård och ibland även vid terminaler. Den gör det svårare att direkt koppla en enskild leverans till en slutprodukt. Många massabruk förvarar sin flis (både den från massaved och sågverksflisen) i stackar, vilket ytterligare komplicerar möjligheterna att hålla reda på enskilda partier. Dessutom är själva massaprocessen ofta en kontinuerlig process med långa uppehållstider i de olika processtegen, vilket skapar blandning och tidsfördröjning.

I ett sågverk å andra sidan är kopplingen mellan enskild stock och sågad vara mycket tydligare, även om man även här har stora utmaningar med att hålla reda på kopplingen mellan råvara och slutprodukt (till exempel Skog m.fl. 2015, Skog m.fl. 2017, Uusijärvi 2000, Lycken & Luomala 2019, Microtec 2020). Sågverkens huvuduppgift är att producera sågade trävaror, men i den processen genereras ett antal bi- eller bioprodukter med olika högt värde. Exempel på sådana är bark, spån, rå- och torrflis. Av dessa har råflisen det högsta värdet, om den har rätt fraktioner för massaindustrin. En kvalitetsdeklaration av leveranserna av sågverksflis skulle öppna möjligheter för massabruken att hantera och utnyttja variationerna för att reducera process- och produktkvalitetsvariationer. I dagsläget är mer detaljerad information om flisen inte tillgänglig.

För att kunna skapa användbara samband mellan råvarans och slutproduktens egenskaper som är möjliga att validera behövs data från mätningar av egenskaper under processen och på slutprodukten. I sågverk har många röntgenmätningar installerats under senare år, vilket ökat tillgången på detaljerad information om innehållet i olika timmerstockar. Utvecklingen inom massaindustrin går framåt på mätsidan även om det fortfarande saknas möjligheter i många bruk att mäta alla process- och produktpåverkande fiberdimensioner och andra vedegenskaper

INFORMATION OM DEN SKOGLIGA RÅVARAN I SKOG OCH PÅ VÄG TILL INDUSTRI

Varje avverkad stam och stock mäts avseende längd och diameter av skördaren i skogen. Skördarföraren registrerar även information om trädslag och skador längs stammen och en GNSS¹-mottagare loggar trädets geografiska position (Arlinger m.fl. 2012). Denna detaljerade information lagras sedan i produktionsfiler där varje producerad stock beskrivs enligt standarden för kommunikation med skogsmaskiner, StanForD 2010. Exempel på data som lagras är stockarnas diametrar, längder, volymer, unika identiteter för varje träd, stock och avverkning samt information om till vilken industri som produkten är destinerad. Med skördardata och programvaror som Skogforsk har tagit fram kan skogen återskapas. Stockarna byggs ihop till träd med hjälp av standardiserade identiteter och en topp läggs till med beräkningsmodulen hprCM (Siljebo m.fl. 2018). Nästa steg är att skogen återskapas. Detta är möjligt då varje träd tilldelas en koordinat utifrån var skördaren var när trädet avverkades. Med hjälp av träden kan sedan nyckeltal för objektet beräknas med modulen hprYield (Möller m.fl., opubl. a), exempelvis medelvolum, grundyta (Gy/ha), trädhöjd (övre höjd – ÖH), trädslagsblandning, medeldiameter (Dgv – grundtyevägd medeldiameter), medelhöjd (Hgv – grundtyevägd medelhöjd), produktutfall samt förekomst av röta och andra defekter. Utifrån dessa data kan skogen indelas i mindre, mer homogena, enheter (beräkningsytor) efter den övre höjden (ÖH) och prognostiserad avverkningstyp (Möller m.fl. 2020 opubl. a), se tabell 1.

Varje träd och beräkningsyta kan sedan kopplas till skogsföretagens register och därigenom kan data om avverkningsobjektet kopplas direkt till de inmätta stockarna vid massaindustrier och sågverk. Exempel på data i skogliga register är trädens ålder (beståndsålder och åldersfunktion) samt objektens geografiska position (höjd över havet, latitud och longitud) och klimat (temperatursumma).

¹ Global Navigation Satellite System (Det amerikanska GPS-systemet är mest känt)

Tabell 1. Data mätta i skördare, beräknade baserat på skördardata (hprCM, hprYield) och från register som används vid egenskapsberäkning för stock och stam.

Egenskap	Parameter	Enhet	Källa
ObjektID	Virkesordernummer	Nummer	Skördare
ObjektID	Kod unik för avverkningsobjektet	Nummer	Skördare
TrädID	Kod unik för stammen	Nummer	Skördare
StockID	Kod unik för stocken	Nummer	Skördare
Trädkoordinater	Wgs84	Grader	Skördare
Trädslag	Species group	Typ	Skördare
DBH	Träddiameter 110 cm över fällkap	mm	Skördare
Stockdiametrar	Rot, mitt, topp	mm pb	Skördare
Barktjocklek	Dubbel bark	mm	Skördare
Stocklängd	Total stocklängd	cm	Skördare
Stockvolym	Volym under bark	m ³ fub	Skördare
Stockvolym	Volym på bark	m ³ fpb	Skördare
Trädhöjd	Beräknad med toppfunktion	cm	hprCM
Avverkningsform	Beräknad med skördardata per beräkningsyta	typ	hprYield
Beståndsålder	Ålder på aktuell avverkning	år	Skogligt register
Beståndskoordinat	Sweref99	m	Skogligt register
Avverkningsform	För aktuellt virkesorder/ avverkningsobjekt	typ	Skogligt register

SPÅRBARHET OCH IDENTITETSKOPPLING MELLAN SKOG OCH INDUSTRI

Virkesordernummer (VO) är ett sammanhållande administrativt begrepp som beskriver vilka produkter som kan produceras vid en viss avverkning och följer med varje lastbilslass som levereras till industrin och vidare genom mätramen vid de flesta sågverk. Detta innebär att för en stor del av de skördade stockarna finns en koppling till vilken avverkning de kommer ifrån. Detta innebär också att egenskaper kan beräknas för i princip varje enskild leverans. Undantag för detta kan ske då virke transporteras via terminaler, vilket inte sällan är fallet då en del företag använder terminaler för att jämna ut svängningarna i de stora vedflöden de har att hantera.

Material och metoder

DATAUNDERLAG

De data som användes till beräkningar inom projektet utgjordes av skördardata, data från skogliga register, data från sågverkens röntgenramar samt data från Biometrias betalningsgrundande inmätning av timmer och massaved vid industri.

Skördardata

Till egenskapsberäkningar mot Östrands massabruk erhöles skördardata från SCA för perioden 180501–190730, se tabell 2 och Figur 1 nedan. Från materialet slumpades ungefär vart fjärde träd ut till egenskapsberäkningar, vilka genomfördes i Skogforsks forskningsdatabas med beräkningsmodulen Propps (se beskrivning av beräkning av egenskaper nedan). Från Sveaskog erhöles data om den barmassaved som levererats till Östrand under perioden 190101–190630, kompletterat med beräknade egenskaper från Sveaskogs eget system (Demonstrator B). Sveaskogs barmassaved levererades från ett geografiskt område i Smålandstrakten, vilket gjorde att egenskaperna i denna ved förväntades avvika från den som SCA levererat från sina förvaltningar i Medelpad, Ångermanland och Jämtland (Figur 1).

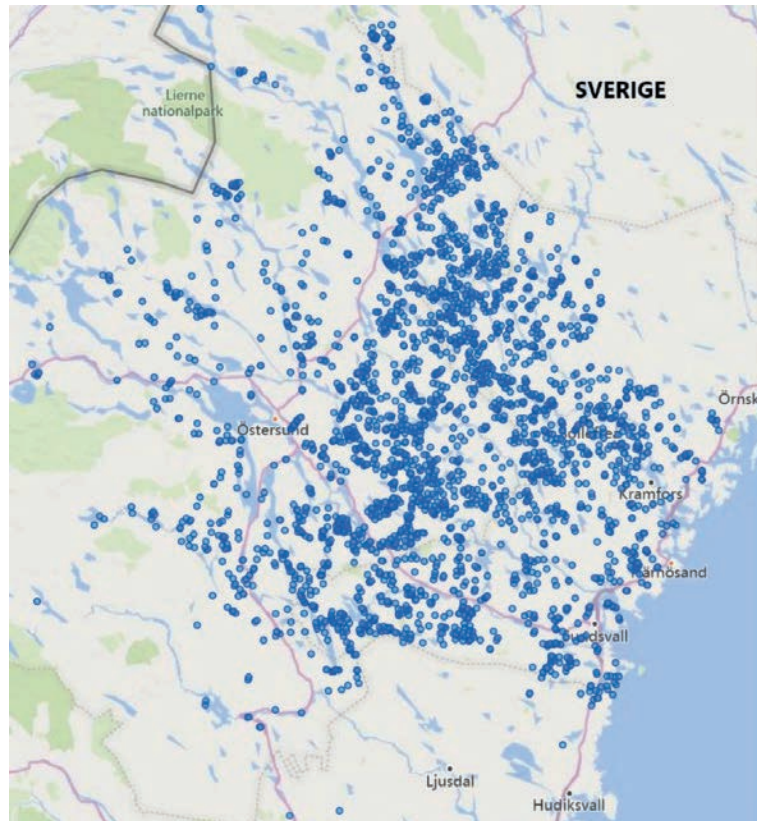
För objekt i materialet där talltimmer avverkades för sågning vid SCA:s sågverk Bollsta, gjordes även analyser på variation av flisegenskaper (Figur 2).

Till egenskapsberäkningarna i Demonstrator A användes skördardata från Holmen Skogs egna direktleveranser av barmassaved med lastbil till Iggesund bruk (för att ha spårbarhet) under första halvåret 2019.

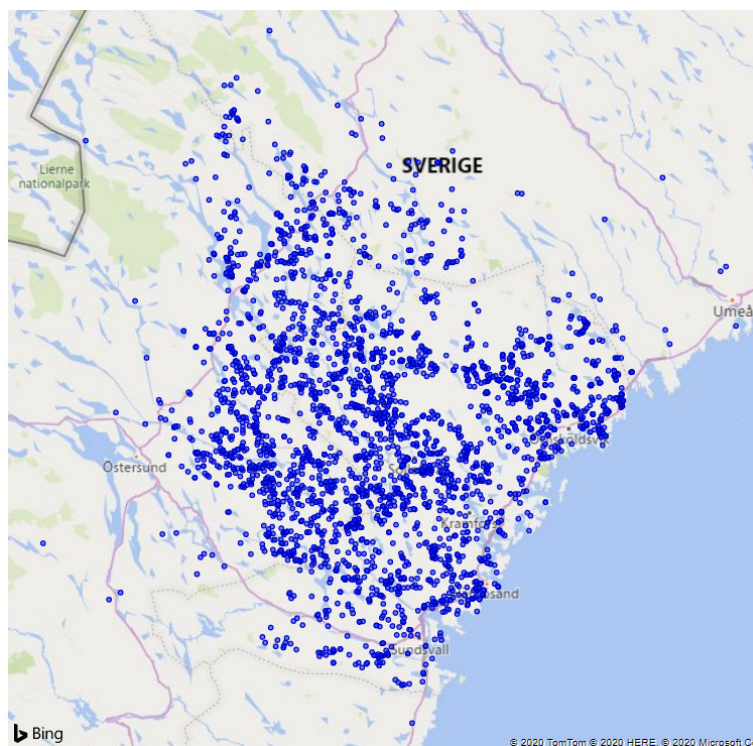
Tabell 2. Beskrivning av de skördardata som användes per fallstudie

Fallstudie/mot-tagande industri	Tidsperiod	Antal VO (st)	Produkt	Antal stockar (st)	Tallvolym (m ³ fub)	Granvolym (m ³ fub)	Andel Gallring (%)
SCA Östrand – egna leveranser SCA	180501–190730	2920	Barrmassa	4 803 408	79 755	150 059	28,3
SCA Östrand – externa leveranser Sveaskog	190101–190630	182	Barrmassa	370 116	35 740*	-	-
SCA Bollsta – egna leveranser SCA	180501–190730	2149	Talltimmer	667 968	117 825	-	6,2
Holmen Iggesund – egna leveranser Holmen	190101–190630	259	Barrmassa	542 739	25 244**	16 012	-

*Total volym barmassaved ** Inklusive massaved av contortatall



Figur 1. De blå prickarna motsvarar avverkningsobjekt där SCA avverkat och levererat massaved till Östrands massabruk i Timrå under perioden 180501–190730 och där data om massaveden använts för att simulera egenskaper på flödet till Östrand.



Figur 2. De blå prickarna motsvarar avverkningsobjekt där SCA avverkat och levererat timmer till Bollsta sågverk under perioden 180501–190730 och där egenskapsberäkningar för sågverksflisanalyser har gjorts inom projektet.

Data från skogliga register

Information om genomsnittlig beståndsålder för de avverkningar som utgjorde dataunderlaget hämtades från de företagsvisa registren hos SCA och Holmen Skog. Åldersuppgiften knöts till skördardata genom virkesordernumret. Den genomsnittliga åldern för SCA:s egna avverkningar som ingick i materialet var 109 år för slutavverkning och 58 år för gallring.

Inmätningssdata

Till den demonstrator som togs fram i samarbete med Biometria och Holmen (Demonstrator A) användes data från Biometrias inmätning av massaved vid Iggesunds bruk. Data hämtades från Biometrias system VIOL och omfattade totalt 2886 leveranser av barrmassaved kopplade till 259 separata virkesordrar under första halvåret 2019. Dessa data innehöll uppgifter om inmätt volym per trädslag samt tidpunkt för första avverkning per virkesorder. Den senare uppgiften användes för att skatta färskheten i massaveden vid tiden för inmätning.

Röntgendata

I studien användes även röntgenramsdata från Bollsta sågverk (SCA). Dessa data har varit grunden för att i större skala koppla ihop stock- och flisegenskaper inne i stocken med variabler som objekt, stocktyper och dimensionsklasser.

Bollsta har en Microtec Logeye mätram (Figur 3), vilken ger en kombination av 3D-lasermätning av stockens yttre dimensioner och röntgenteknik för inre egenskaper, för att sortera sågtimret i olika kvaliteter. Logeye mäter stockvis volym, diameter på och under bark, kvalitet och kvalitetsegenskaper. Egenskaper som var i fokus i den här analysen var kärnvedsinnehåll, densitet, friskkvist, stocktyp (rotstock eller övriga) samt årsringsbredd (för skattning av ålder).



Figur 3. Bild på mätram Microtec Logeye 300.

BERÄKNING AV EGENSKAPER HOS MASSAVED

Genom att utnyttja vetenskapligt framtagna prediktionsmodeller utformade för att kunna baseras på data från skördarens produktionsrapportering (dimensioner, geografisk belägenhet) och uppgifter om träd/beståndsålder har en rad inre egenskaper hos stockarna kunnat beräknas. Densitet och kärnvedsinnehåll (Wilhelmsson m.fl. 2002), grenegenskaper (Moberg 2006), antal årsringar i stocktvärsnitt (indata till flertalet egenskapsmodeller och beräkning av avstånd mellan kvistvarv (Wilhelmsson 2006) samt fiber dimensioner (Ekenstedt m.fl. 2002) är exempel på egenskaper med relevans för skogsindustrin. Modellerna har implementerats av Skogforsk i beräkningsmodulen Propps (Ohlström 2020). Tabell 3 nedan beskriver vilka egenskaper som beräknas och var modellen ursprungligen finns publicerad.

Tabell 3. Källhänvisningar för hur olika egenskaper beräknas i Propps. Beräkningarna av egenskaper redovisas som stockmedelvärden baserade på volymvägd modellering av ett tvärsnitt per dm stocklängd.

Egenskap	Enhet	Referens
Densitet torr-rå ¹	kg/m ³ fub	Wilhelmsson m.fl. 2002. Funktion för tvärsnitt utmed stammen
Kärnvedsandel ¹	Medel % av cylindervolymen	Wilhelmsson m.fl. 2002. Volym beräknad utifrån funktion för tvärsnittsareor utmed stammen
Bark	Medel av dubbel barktjocklek, mm	Hannrup 2004
Sommarved ¹	Medel av volym, %	Wilhelmsson m.fl. 2002. Volym beräknad utifrån funktion för tvärsnittsareor utmed stammen
Antal årsringar	Medel av antal årsringar i stocken	Wilhelmsson 2006
Fiberlängd ¹	Medellängd, mm	Ekenstedt m.fl. 2003 (något modifierad). Beräknat för tvärsnitt utmed stammen
Fiberväggstjocklek ¹	Medel av cellväggstjockleken, µm	Ekenstedt m.fl. 2003
Fiberbredd ¹	Medelbredd, µm	Ekenstedt m.fl. 2003
Friskkvistprocent	Andel av stocklängden som definieras som frisk, %	Möller 2017, modifierad funktion baserat på Möller 2003, Arbetsrapport 553, Skogforsk
Max kvistdiameter	Medel av största kvist längs stocken, mm	Moberg 1999, modifierad av Moberg 2004, och Moberg 2006
Rådensitet ¹	kg/m ³ fub	Wilhelmsson & Moberg 2004 (i bilaga 1)
Torrhalt	% torr ved av vedens totalvikt Torr-rådensitet delat med rådensitet	Wilhelmsson 2002, Wilhelmsson & Moberg 2004
BarkDensitet	Torr-rå densitet för barken, kg/m ³	Wilhelmsson & Moberg 2004 (i bilaga 1). Preliminär modell baserad på litteratordata
Min årsringsantal ¹	Minsta ålder för stocken	Wilhelmsson 2006
Max årsringsantal ¹	Max ålder för stocken	Wilhelmsson 2006

¹ Modellen kräver indata om tvärsnittsålder som beräknas med modellen för antal årsringar (Wilhelmsson 2006)

BERÄKNING AV EGENSKAPER HOS SÅGVERKSFLIS

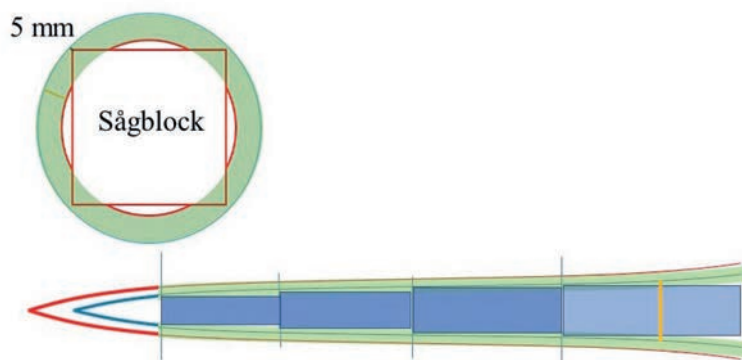
Vid produktion av sågade trävaror delas rundvirket i timmerstockarna till kvadratiska eller rektangulära utbyten, enligt postningsmönster som normalt utgår från stockarnas centrum. Stockarnas geometri i förhållande till sågutbytena leder därmed till betydande volymer av så kallade bakar som normalt huggs till sågverksflis. Sågverkets produktpalett i förhållande till timmerflödets diameter- och längdfördelning och stocktyper/kvaliteter liksom de enskilda stockarnas rakheter, ovalitet och förväntat kvalitetsutfall/prognostiserade virkesegenskaper påverkar också postningsbesluten. Normalt innebär detta att mellan 40 och 60 procent av en timmerstocks volym blir solida sågutbyten medan den resterande, framför allt yttersta volymen blir flis, kutterspån eller sågspån.

Under projektet undersöktes två olika angreppssätt för att modellera egenskaper hos sågverksflisen, dels baserat på skördarinformation och egenskapsmodeller (A) dels baserat på röntgendata (B).

Alternativ A: Modell för beräkning av egenskaper hos sågverksflis baserad på skördardata och beståndsålder

Inom Digichain har nya, radiellt uppdelade, modeller för sågverksflisens ved- och fiber-egenskaper tagits fram genom att som grund utnyttja tidigare utvecklade prediktionsmodeller för gran och tall. Dessa modeller som ursprungligen togs fram för att kunna operera på skördardata enligt StanForD, kompletterat med bestånds-/trädålder och geografisk position beräknar egenskaper som torr-rådensitet, rådensitet (färskt virke), kärnved, vår-/sommarvedsandel, ungdomsvedsandel (Wilhelmsson m.fl. 2002), fiberlängd, fiberbredd och cellväggstjocklek (Ekenstedt m.fl. 2003), kompletterat med fukthalt (Wilhelmsson & Moberg 2004); allt baserat på hela, radiella stamtvärsnitt. Vidare har vi kunnat demonstrera en del tidigare utvecklade funktioner för pappersegenskaper (givet kombination med process), som till exempel drag- och rivindex (Jonasson, red 2000) och kollapsbarhet. Som ett nödvändigt stöd för praktisk tillämpning baserad på skördarinformation eller stående skog utvecklades även en funktion som beräknar antalet årsringar i ett godtyckligt stamtvärsnitt (Wilhelmsson 2006). Funktionen baseras på ingångsvariablerna brösthöjdsålder och relativ diameter utmed stammen (=aktuell tvärsnittsdialoger delad med brösthöjdsdiameteren).

Sågverksflisens egenskaper beräknas genom att hela tvärsnittets egenskaper beräknas (predikteras) med aktuella skördardata från den skördade stammen samtidigt som egenskaperna hos ett "inre träd" (beräknat utifrån historiskt tillväxtförlopp för trädet) representerande sågutbytets volym beräknas med samma funktioner. Från detta beräknas egenskaperna hos sågverksflisen genom att jämföra den skördade stockens totala beräknade genomsnittsegenskaper med den "inre stocken" från det "inre trädets" beräknade egenskaper. Från dessa två ingångsvärden kan funktionen nu i stället lösas med avseende på beräknade egenskaper för veden utanför den "inre stocken", det vill säga den ved som motsvarar sågverksflisen (Figur 4). Utöver beståndsålder visar analyserna av trädens historiska tillväxtförlopp att beskrivningen blir bättre om både ståndortsindex (SI) och det aktuella trädets relativa diameter beräknad som trädets brösthöjdsdiameter/grundtyevägd brösthöjdsdiameter för beståndet, inkluderas som förklarande variabler (Tabell 4).



Figur 4. Flisberäkningar utgår från att en inre cylinder motsvarande ytan på sågblocket beräknas och "dras bort" från hela stockens tvärsnittsmedelvärde. Den yttre vedens egenskaper beräknas sedan som funktion av skillnaden mellan hela tvärsnittets och det inre tvärsnittets egenskaper. I detta exempel går sågblocket ut till 5 mm från toppdiametern under bark.

För att det inre trädet ska kunna beskrivas så korrekt som möjligt i förhållande till hela dess historiska tillväxtförlopp för veden som utgör sågutbytet, respektive veden som utgör sågverksflisen har nya funktioner för årsringsutveckling tagits fram. Dessa baseras på den detaljerade årsringsinformation som mättes och registrerades från samma stamtvärsnitt som ligger bakom de ursprungliga egenskapsmodellerna.

Tabell 4. Variabler som ingår i modellen för att beräkna den relativa årsringsfördelningen (RelAge) mellan den inre (sågutbytet) och den yttre (sågverksflisen) tvärsnittsytan

Variabelnamn	Förklaring
RelAge (beroende var)	Beräknad procentandel av det totala antalet årsringar i tvärsnittet
MbrTvar (fix)	Medelårsringsbredd märg-bark i aktuellt tvärsnitt
ProcArea (fix)	Ytan på den inre cylindern relativt hela tvärsnittet
RelDgv (fix)	Det aktuell trädets diameter i brösthöjd/grundytevägd medeldiameter för beräkningsytan
SI (fix)	Ståndortsindex (Hägglund & Lundmark 1987)
Avd (Random)	Specifika beståndseffekter (ej förklarade av de fixa effekterna)
Trdnr (Avd*Yta)	Specifik trädeffekt inom avdelning och yta (3 ytor/avd) som inte förklaras av de fixa effekterna. Beräkningen baseras på 2-7 tvärsnitt per träd beroende på trädstorlek
Residual	Återstående oförklarad variation

I Figur 5 och Figur 6 redovisas resultatutskrifter från modelltesterna SAS Proc Mixed. Figur 7 visar exempel på resultat när modellerna för årsringsutveckling (Figur 5 och Figur 6) kombinerats med de tidigare utvecklade egenskapsmodellerna applicerade på det "inre historiska trädet" (sågutbytet, blå siffror på vit bakgrund), respektive den "yttre veden", sågverksflisen (grön bakgrund).

Mixed Models Predictions
The Mixed Procedure

Trslg=1

Model Information	
Data Set	WORK.SORTTEMPTABLESORTED
Dependent Variable	RelAge
Covariance Structure	Variance Components
Estimation Method	REML
Residual Variance Method	Profile
Fixed Effects SE Method	Model-Based
Degrees of Freedom Method	Containment

Class Level Information	
Class	Levels Values
Avd	20 15 16 17 18 27 28 29 30 68 69 70 71 82 83 86 87 88 89 90 91
Yta	2 A B
Trdnr	3 1 2 3

Dimensions	
Covariance Parameters	3
Columns in X	7
Columns in Z	111
Subjects	1
Max Obs per Subject	16414

Number of Observations	
Number of Observations Read	16414
Number of Observations Used	16414
Number of Observations Not Used	0

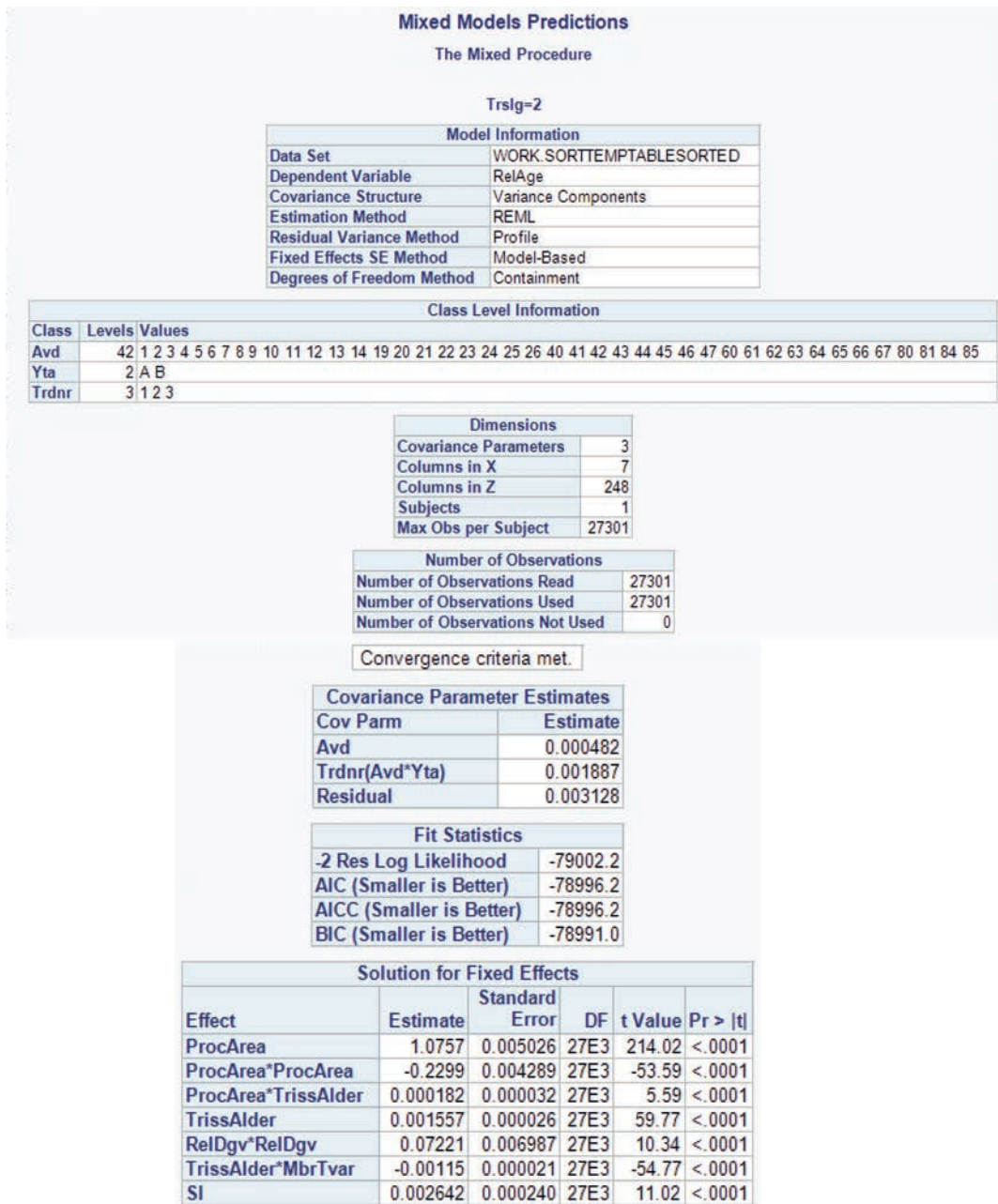
Convergence criteria met.

Covariance Parameter Estimates	
Cov Parm	Estimate
Avd	0.003626
Trdnr(Avd*Yta)	0.001742
Residual	0.002724

Fit Statistics	
-2 Res Log Likelihood	-49819.3
AIC (Smaller is Better)	-49813.3
AICC (Smaller is Better)	-49813.3
BIC (Smaller is Better)	-49810.3

Solution for Fixed Effects					
Effect	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t
ProcArea	1.0885	0.006597	16E3	165.00	<.0001
ProcArea*ProcArea	-0.2800	0.005185	16E3	-54.00	<.0001
ProcArea*TrissAlder	0.001181	0.000049	16E3	24.28	<.0001
TrissAlder	0.000956	0.000055	16E3	17.40	<.0001
RelDgv*RelDgv	0.09288	0.01587	16E3	5.85	<.0001
TrissAlder*MbrTvar	-0.00250	0.000055	16E3	-45.15	<.0001
SI	0.006478	0.000877	16E3	7.39	<.0001

Figur 5. Resultatutskrift från framtagen linjär modell för att beräkna relativ ålder (RelAge) (%) för tvärsnitt hos tall > 100 mm i brösthöjdsdiameter.



Figur 6. Resultatutskrift från framtagen linjär modell för att beräkna relativ ålder (RelAge) (%) för tvärsnitt hos gran > 100 mm i brösthöjdsdiameter.

Alternativ B: Modeller för skattning av fliseegenskaper från mätramsdata – modellering av densitet från röntgendata

Vid större sågverksindustrier brukas idag en eller flera mätramar för sortering av timmer till olika sågklasser. I många fall handlar det om en 3D-mätram för skattning av *yttre egenskaper* och en konventionell röntgenmätram, med en eller ett fåtal källdetektorpar, för skattning av *inre egenskaper*. Klassindelningen baseras i huvudsak på toppdiameter men även på kvalitetsdefinierande egenskaper så som stocktyp (rotstock eller ej), kärnvedsandel, kvistvarvsavstånd, densitet, årsringsbredder, friskkvistighet, med flera. Då sågverksflisen traditionellt betraktats som en biprodukt har intresset att bestämma dess egenskaper varit lågt.

Vissa vedegenskaper så som fiberlängd, fiberbredd och cellväggstjocklek kan inte direkt observeras vid den upplösning som erbjuds av dagens mätramar, men kan möjligen predikteras från observerbara egenskaper. För att utvärdera potentialen med en sådan indirekt metod för skattning av vedegenskaper krävs dock att en stor mängd mätramsdata utökas med referensdata för de egenskaper som ska predikteras. Detta har inte utvärderats inom detta projekt. Andra egenskaper, så som flisens densitet, är direkt mätbara.

Som bekant definieras densitet som kvoten mellan massa och volym, men eftersom trä är ett hygroskopiskt material som uppvisar fuktrörelser, finns många olika sätt att beskriva dess densitet. För att göra det måste först fuktkvoten definieras. Inom den trämekaniska industrin beskrivs fukttinnehållet i ett stycke trä av fuktkvoten

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} \quad (1)$$

där m_u anger styckets massa (ved och vatten) och m_0 samma styckes (ugns-)torra massa (ved). Andra sätt att beskriva fukttinnehållet är fukthalt och torrhalt. De behandlas inte här.

En förenklad, men ofta använd modell, anger att inga fuktrörelser förekommer över den så kallade fibermättnadsfuktkvoten u_{fm} , medan fuktrörelserna därunder är sådana att den relativa volymförändringen, α , från (ugns)torrt tillstånd är proportionell mot fuktkvoten, det vill säga.

$$\alpha(u) = \frac{V_u - V_0}{V_0} = \begin{cases} \alpha_{fm} & u \geq u_{fm} \\ \frac{u}{u_{fm}} \alpha_{fm} & u < u_{fm} \end{cases} \quad (2)$$

där V_u anger volymen vid fuktkvoten u och $\alpha_{fm} \equiv \alpha(u_{fm})$ anger den relativa volymförändringen som uppnås vid fibermättnadsfuktkvoten. För att omfatta alla upptänkliga densitetsvarianter definierar vi densiteten (ρ) som

$$\rho_{u_1, u_2} = \frac{m_{u_1}}{V_{u_2}} \quad (3)$$

där massan anges vid fuktkvoten u_1 och volymen vid fuktkvoten u_2 . I praktiken är det dock ett fåtal varianter som används, nämligen torrdensiteten $\rho_{0,0}$, rådensiteten $\rho_{r\grave{a}} \equiv \rho_{u_{r\grave{a}},u_{r\grave{a}}}$, och torr/rådensiteten $\rho_{0,u_{r\grave{a}}}$, där $u_{r\grave{a}}$ anger fuktkvoten i rätt tillstånd. Med hjälp av formlerna (1) och (2) erhålls följande formel

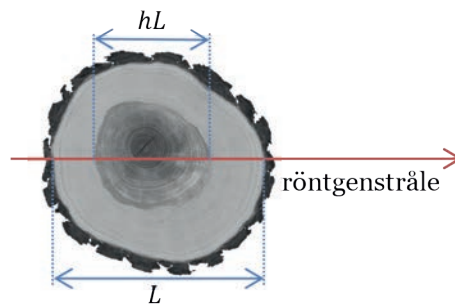
$$\rho_{u_1,u_2} = \frac{1 + u_1}{1 + \alpha(u_2)} \rho_{0,0} \quad (4)$$

för omvandling mellan olika densitetsvarianter.

Konventionella röntgenmätningar mäter hur mycket röntgenstrålningen attenueras (dämpas) när den växelverkar med ett stocktvärsnitt som befinner sig mellan ramens källor och detektorer. I huvudsak avspeglar attenueringen som uppmäts vid en viss position på detektorn medelvärdet $\langle \rho_{r\grave{a}} \rangle$ av den aktuella rådensiteten längs med den tänkta linje som förbinder denna position och röntgenkällan, nedan kallad röntgenstråle eller bara stråle. Splintens rådensitet kan på så sätt mätas med de strålar som endast går genom splinten. I praktiken är splintens fuktkvot okänd och inte heller direkt mätbar med konventionella röntgenmätningar, så varken torrdensiteten eller torr-rådensiteten kan beräknas med formel (4). Skog m.fl. (2010) har dock beskrivit ett listigt förfarande för indirekt skattning av såväl kärnans som splintens torrdensitet. Det första steget i deras metod är att utnyttja att medeldensiteten längs en stråle som passerar genom både kärna och splint uppfyller

$$\langle \rho_{r\grave{a}} \rangle = h \langle \rho_{r\grave{a}} \rangle_k + (1 - h) \langle \rho_{r\grave{a}} \rangle_s \quad (5)$$

där $0 < h < 1$ anger kärnvedsandelen längs med strålen samt $\langle \rho_{r\grave{a}} \rangle_k$ och $\langle \rho_{r\grave{a}} \rangle_s$ medelvärden av rådensiteten längs med de delar av strålen som passerar genom kärnan respektive splinten (Figur 8).



Figur 8. Medelvärdet av rådensiteten längs med en röntgenstråle kan beräknas som en viktad summa av medelvärdet av rådensiteten längs med den del av röntgenstrålen som passerar genom kärnveden och medelvärdet längs med de delar av röntgenstrålen som passerar genom splintveden. Vikterna för de två bidragen ges av h respektive $1 - h$, där h betecknar kärnvedsandelen längs med röntgenstrålen.

Enligt Esping (1992) har kärnan en nära konstant fuktkvot u_k , så formel (4) medför att

$\langle \rho_{r\ddot{a}} \rangle_k = \frac{1+u_k}{1+\alpha(u_k)} \langle \rho_{0,0} \rangle_k$, vilket i ekvation (5) ger

$$\langle \rho_{r\ddot{a}} \rangle = h \frac{1+u_k}{1+\alpha(u_k)} \langle \rho_{0,0} \rangle_k + (1-h) \langle \rho_{r\ddot{a}} \rangle_s \quad (6)$$

eller

$$\langle \rho_{0,0} \rangle_k = \frac{1+\alpha(u_k)}{1+u_k} \left(\frac{1}{h} \langle \rho_{r\ddot{a}} \rangle - \frac{(1-h)}{h} \langle \rho_{r\ddot{a}} \rangle_s \right) \quad (7)$$

Det sista steget är att utnyttja empiriska samband mellan kärnans och splintens torrdensiteter

$$\langle \rho_{0,0} \rangle_s = f \left(\langle \rho_{0,0} \rangle_k \right) \quad (8)$$

Om så önskas kan splintens torrdensitet omvandlas till torr-rådensitet med hjälp formel (4). Notera att eftersom splintens fuktkvot i rått tillstånd är över fibermättnadsfuktkvoten gäller enligt modell (2) att $\alpha(u_{r\ddot{a}}) = \alpha_{fm}$.

Det bör påpekas att den skattning av splintens torrdensitet som ges av formel (8) är behäftad med relativt stor osäkerhet — de naturliga variationerna i parametrar som fibermättnadsfuktkvoten u_{fm} , den relativa volymändringen vid fibermättnad α_{fm} och kärnvedens fuktkvot u_k , liksom det faktum att α_{fm} varierar med densiteten har försumrats. Dessutom är det empiriska sambandet (8) relativt svagt. Skog m.fl. (2010), som baserar sina resultat på simuleringsstudier där data från en konventionell röntgenmättram och 3D-mättram genereras från röntgentomogram (CT), finner att kvadratroten ur den kvadratiske avvikelsen (RMSE, Root Mean Square Error) mellan CT-referensen och skattningen av splintens torrdensitet är 43 kg/m³ (beräknat för 553 av 560 stockar), eller knappt tio procent. Huruvida den metod som beskrivits ovan, eller liknande metoder som baseras på data från enskilda röntgenstrålar, är tillräckligt noggrann för klassning eller sortering av sågverksflis har inte undersökts i detta projekt. Istället har möjligheten att använda formlerna (7) och (8) för skattning av splintvedens torrdensitet från aggregerad information, så som stockmedelvärdet av rådensiteten, splintvedens medeldensitet i toppänden samt medelvärden av stockdiametern under bark och kärnvedsdiametern, undersökts. Anledningen till att undersöka sådana skattningar är att aggregerat data är lättillgängligt, till skillnad från data från enskilda röntgenstrålar.

Slutsatsen av våra undersökningar är dock att en sådan skattning från aggregerad information inte är lämpad för klassning eller sortering av sågverksflis, då osäkerheten bedöms vara för stor.

MODELLER FÖR SIMULERING AV MASSABRUKETS VEDFLÖDE

Digitaliserade vedflöden från skog till industri ger förutsättningar att följa ved- och fiberegenskaper, vilket skapar möjligheter att mer aktivt hantera vedflödet. Oavsett om ett pappers- eller massabruk strävar efter jämnhet eller om man kör kampanjer mot specifika produktkvaliteter, ger kunskap om ved- och fiberegenskaper både möjlighet att förstå och att kontrollera process- och produktvariabilitet.

För detta krävs simulerings- och processmodeller för olika delprocesser inom bruket. Vissa kan hanteras med IT-verktyg för hur vedråvaran hanteras inom bruket, medan andra kräver mer komplexa modellbeskrivningar. Vedgården där inkommande stockar mellanlagras är ett exempel på det första, och dynamiska omblandningsmodeller för flisstackar/-silos är ett exempel på det senare.

För att uppnå maximal nytta med digitaliserade vedflöden är det nödvändigt att veden kan följas hela vägen från skörd i skogen, via vedgården till kokaren. Med detta uppfyllt, skapas en utmärkt möjlighet för att hantera och effektivisera brukets vedhantering och processer. Kombinerat med AI och processtyrning kan processerna effektiviseras samt möjliggöra detektion av avvikelser som är skadliga för processen och/eller produkten.

Vedgården

Inom projektet hanterades data om veden på vedgården med hjälp av en relationsdatabas där data från stockar samlades för senare bearbetning.

Inom den del av projektet som rörde simulering för massabruket var enbart information om när veden hade skördats tillgängligt. Information om hur och när veden levererades till bruket saknades alltså. Det är uppgifter som vid en skarp användning ska ingå i informationsflödet. För att skapa en simulerad (men relevant) tidsdynamik för variationen på vedgården fördelades veden ut från varje avverkning över tiden och med ett rimligt inflöde till respektive bruk. I detta steg simulerades alltså vedtravar levererade till brukets vedgård, och genomsnittliga egenskaper beräknades för respektive vedtrave.

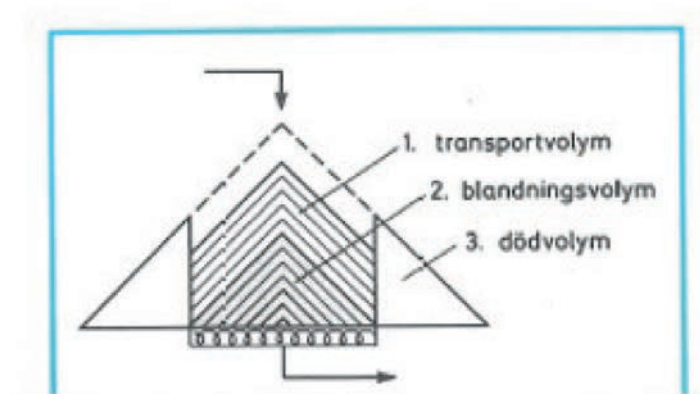
De simulerade vedtravarna lagrades i relationsdatabasen. Genom att hantera travarna enligt principen först in först ut simulerades ett tidsflöde i hur vedegenskaperna till bruket varierade. I detta fall förenklades hanteringen av travarna på vedgården så att ingen omblandning mellan travarna inkluderades. I en senare verklig situation bör även en viss omblandning mellan travarna inkluderas.

Förutom att simulera tidsdynamik i vedflöden tillåter relationsdatabasen att vedflödena styrs aktivt. Detta kan göras baserat på skogliga parametrar, exempelvis avverkningssålder och/eller beståndegenskaper. Men även styrning baserat på urval av önskade ved- och fiberegenskaper på travnivå är möjligt.

Flisstackar

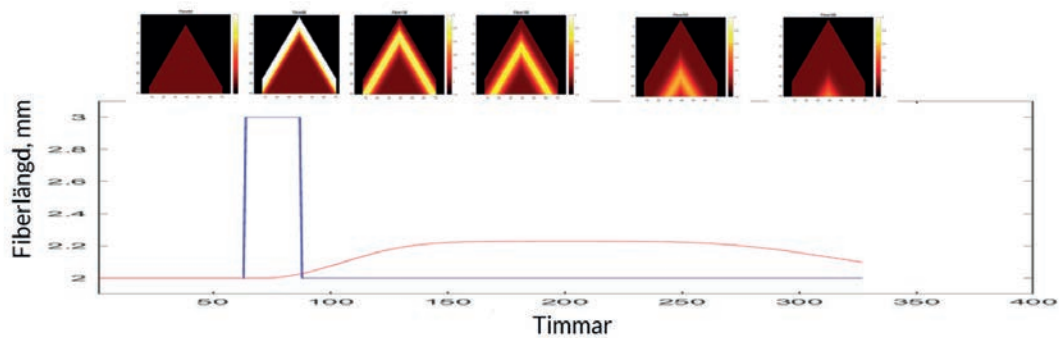
Inom projektet användes en simuleringsmodell för flistransport i flisstackar. Modellen bygger på en artikel i Svensk Papperstidning (Lundqvist & Brattberg 1983).

I den typ av flisstack som modellerades tillförs flisen till toppen på en rund stack. För en utsträckt stack motsvaras det av toppen längs stackens utsträckning. Vid varje tidpunkt kommer den tillförda flisen, som illustreras av Figur 9, att bilda ett skikt över stackens "aktiva" yta. I stacken rör sig skikten, från olika tidpunkter, mot bottenytan. De yttersta delarna antas ligga stilla och bildar väggar, det vill säga det uppstår en "dödvolym" där. Vid bottenytan matas horisontella skikt av flis ut och förs vidare till processen. Varje horisontellt snitt kommer, då tillförseln av flis följer en rasvinkel medan utmatningen görs av horisontella bottenskikt, att innehålla flis från olika tidslager. Homogeniseringstacken ger en modelleringsbar blandning och utjämning av den utmatade flisens egenskaper.



Figur 9. Principskiss över hur flistransporten genom flisstacken har modellerats.

Flisstacksmodellen testades i Matlab och Figur 9 illustrerar hur en kortvarig puls i flisstacken dämpas ut i stacken. Pulsen med varaktighet på 30 timmar med en ökning av medelfiberlängden i flisen från 2,0 till 3,0 mm, tar ca 200 timmar att färdas genom flisstacken. Maximala ökningen av medelfiberlängden i flisutflödet förorsakad av pulsen är 0,2 mm. Beräkningarna baseras på en stack med volymen 10 000 m³, flödet in och ut till stacken är ca 140 m³/h. Figur 10 illustrerar hur den avvikande flisen fördelas ut på ytan och sen succesivt åker ner till botten i stacken. Flisen som matas ut ur stacken antas ha egenskaper som motsvarar genomsnittet hos flisen i bottenskiktet. Flisstackens diameter är 30 meter i bottenskiktet (basen på triangeln i Figur 10 är 30 meter).



Figur 10. Den blå kurvan visar medelfiberlängden i flisen inmatad till flisstacken. Vid tiden 60 timmar ökar medelfiberlängden i flisen till stacken från 2 till 3 mm, under 30 timmar. Den röda kurvan visar den beräknade medelfiberlängden i den utmatade flisen från den simulerade stacken.

Prognos produkttegenskaper

De simuleringar av produkttegenskaper som redovisas i denna rapport bygger på modeller från tidigare forskningsprogram på RISE Innventia (Grahn m.fl. 2010). Modellerna är utvecklade för labbmassor och labbark. Indata till modellerna är fiberegenskaper och veddensitet. De modeller som inkluderats i den här studien är modeller för arkdensitet och dragindex.

Modellerna är inte lämpliga för att skatta absoluta värden i egenskaper i produkter från ett pappersbruk. Till stor del beror det på att produkter som bruket tillverkar och de processer som tillverkningen innefattar inte direkt motsvaras av de labprocesser som använts för att ta fram de massor och labbark som använts för utvecklingen av modellerna. Modellerna förväntas dock ge en god indikation på effekten av variationer i vedråvaran på fabriksstillverkad massa och pappersprodukter.

I det här fallet ger modellerna en indikation på hur arkdensiteten och dragindex och relaterade egenskaper kommer att förändras i fabriksstillverkade produkter tillverkade med de förändrade vedegenskaperna.

Med en medföljande beskrivning av ved- och fiberegenskaper skapas möjligheter att utveckla bruksspecifika modeller som ger mer detaljerad och kvantitativ information om effekten av ved- och fibervariationen på det enskilda brukets produkter och processer.

Resultat och diskussion del 1:

Utfall av fallstudierna

I projektet hanterades ved för massbruken SCA Östrand och Holmen Iggesund med ursprung från tre geografiska områden. I samtliga fall fanns skördardata som beskriver alla stockar. Dock saknades tillgång till data från den betalningsgrundande inmätningen vid fabriksgrind. För båda bruken och samtliga tre geografiska områden har vedflödet därför simulerats utifrån avverkningstidpunkt. Ett antal travar om 15 m^3 har skapats. För respektive bruk och för respektive avverkningsområde har ett vedinflöde om 2000 m^3 per dygn antagits. Det verkliga vedflödet in till bruken är olika men i detta fall har samma simuleringsgrund satts, dels för att förenkla och dels för att göra resultaten mer jämförbara i hur variationerna är mellan bruken och upptagningsområdena. Till viss del har också det relativt begränsade underlaget för simuleringen styrt att vi valt att behålla 2000 m^3 för samtliga bruk. Om den verkliga vedförbrukningen används blir tidsserien för simuleringen kort. Detta beror på att de vedflöden vi har tillgång till enbart utgör den egenavverkade skogen och som dessutom levererats till bruket på bil. Dessa flöden valdes eftersom leveranserna var möjliga att spåra tillbaka till skogen.

De dataset som finns tillgängliga för Östrand och Iggesund är omfattande, men utgör trots det en mycket liten andel av den ved som bruken förbrukar. Det rör sig om i storleksordningen 20 procent av det totala vedflödet till bruken. Det vedflöde som är inkluderat är från företagets egen skog och levererat direkt till bruket. Skog inköpt från externa leverantörer är inte inkluderad, undantaget Sveaskogs leveranser till Östrand.

I Figur 11 till och med Figur 23, samt Figur 29 och Figur 30 visas variationen i relevanta ved- och fiberegenskaper i respektive område. Två typer av grafer presenteras. Simuleringen i Figur 11, Figur 13 och Figur 29 representerar travar per dag. Varje punkt i grafen representerar en trave om 15 m^3 och vilken volymviktad medelegenskap den traven ger. De mörkare röda punkterna är ett medelvärde för alla levererade travar under sex timmar. Figur 12, Figur 14 och Figur 30 visar travarna mot travnummer. I Figur 12, Figur 14 och Figur 30 finns också flytande medelvärden beräknade (röda kurvor). Medelvärdesberäkningen omfattar 25 travar, vilket motsvarar ca 4,5 timmar i vedflödet (baserat på 15 m^3 per trave och 2000 m^3 per dygn). Den senare Figurtypen visar tydligare variationen mellan travarna och illustrerar också bättre hur stora volymer det finns av respektive vedegenskap, medan den förra åskådliggör hur variationer på travnivå inom och mellan dagar kan se ut.

För Östrand gjordes en fördjupad analys där egenskaper för slutprodukten simulerades baserat på modeller av egenskaper för labbark. Valet av Östrand baserades på att den implementeringen av ved- och fiberegenskapsmodellerna i simuleringsberäkningarna är en senare och mer mogen version.

I den fördjupade analysen beräknades och illustrerades följande:

- Simulering av arkegenskaper
- Variationer mellan avverkningstyperna gallring och slutavverkning för respektive gran och tall
- Skillnader i egenskaper mellan sågverksflis och rundved
- Hur variationer i egenskaper dämpas av en flisstack

FALLSTUDIE I: SCA ÖSTRAND

Vedflöden till Östrand

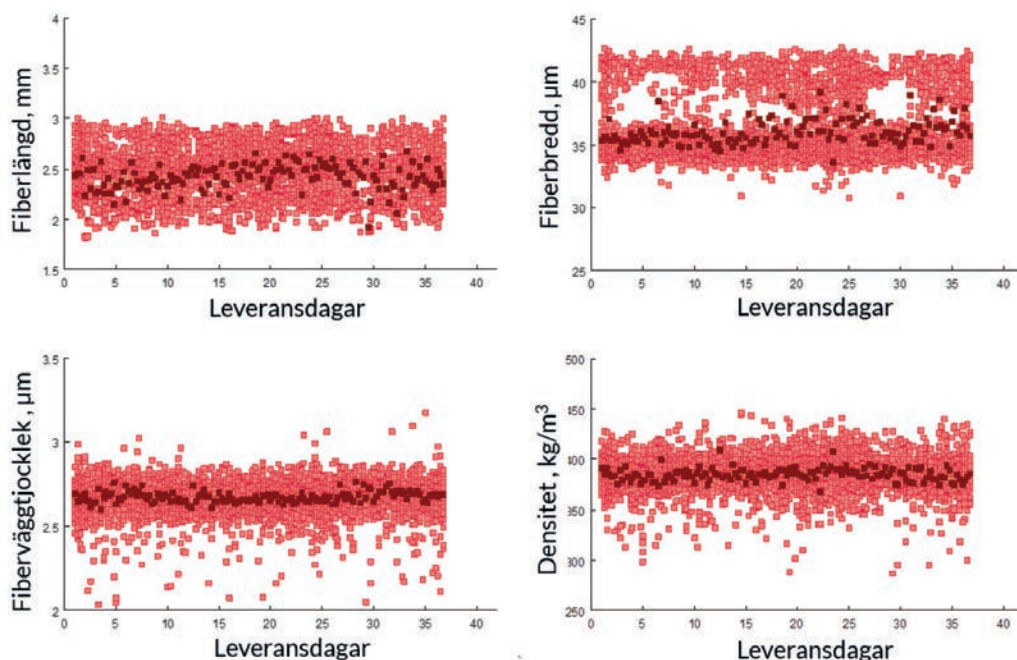
En stor del av veden till Östrand kommer från SCA Skog. Utöver de interna leveranserna tillkommer i denna studie också massaved som levererats av Sveaskog, med ursprung i Smålandstrakten. Tabell 2 beskriver omfattningen av data från SCA respektive Sveaskog med koppling till Östrand.

Resultatet från simuleringen gav ett vedflöde motsvarande ca 35 dagar och omfattande ca 7000 travar levererade av SCA Skog. För Sveaskog är motsvarande siffror ca 18 dagar och ca 2400 travar.

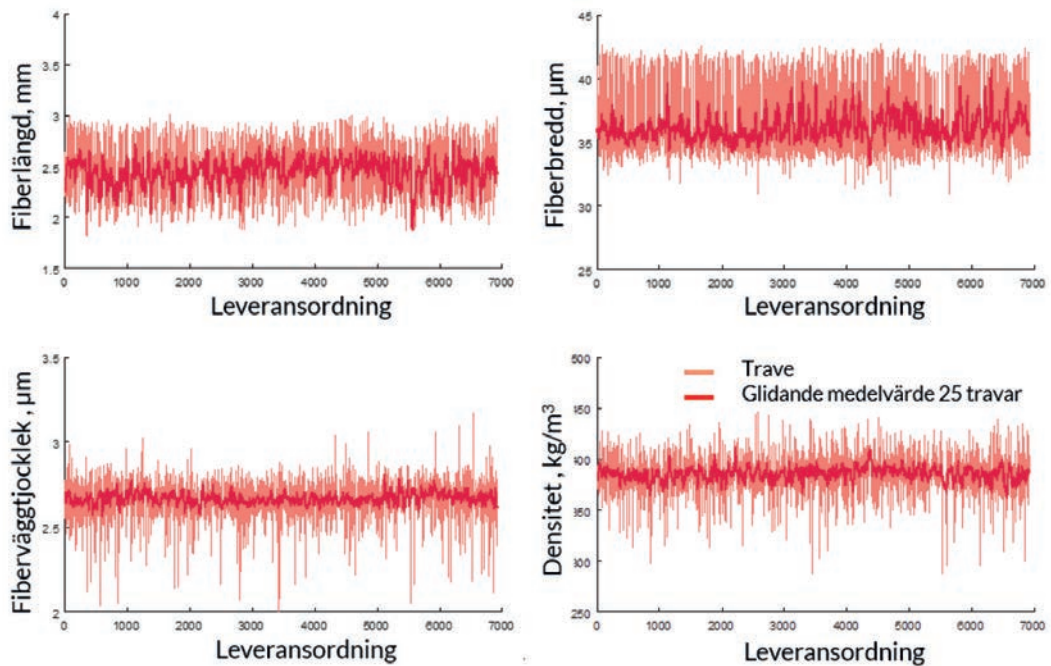
Variationerna mellan travar är betydande för samtliga egenskaper och områden. För Östrand (Figur 11) varierar medelvärdena för fiberlängder mellan ca 2 och ca 3 mm, fibervägg tjocklek har något mindre variation, ca 2,5 μm till 3 μm , men det finns enstaka travar med lägre värden.

Om veden från Östrand delas upp på ålder kan man se att de bredare fibrerna kommer från yngre avverkningar (visas inte här). Ur Figur 11 framgår att det finns variationer i fördelningen av antal travar med bredare respektive smalare fibrer, vilket orsakas av avverkningar från skog med olika ålder. Om sådana variationer i avverkningstyp är ihållande kommer stora variationer i fiberegenskaperna att slå igenom och påverka processerna och produkterna.

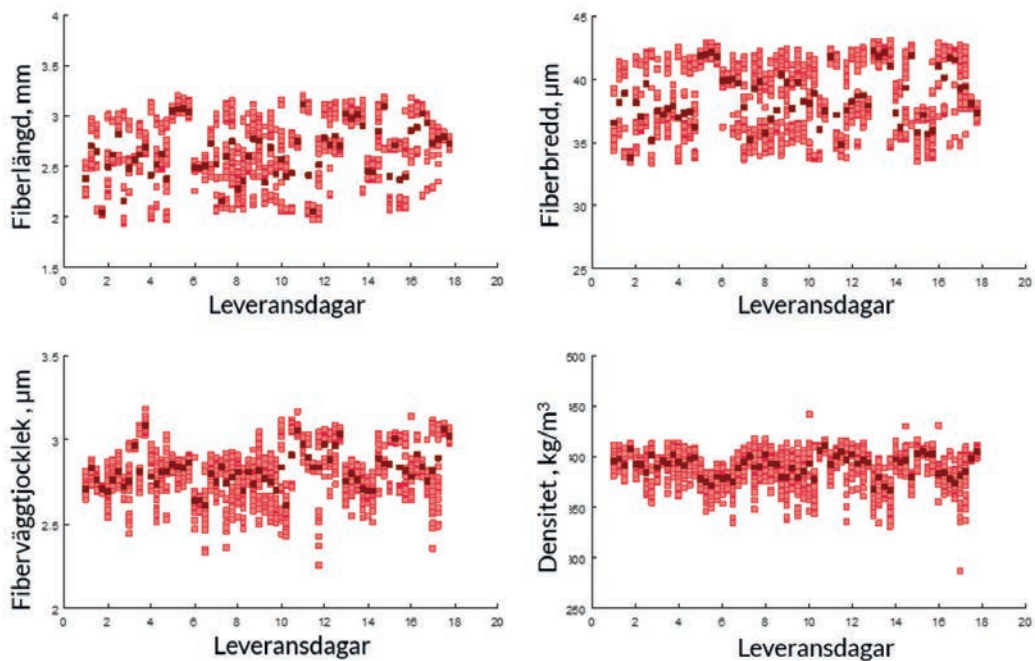
Variationer för veden levererad av Sveaskog (Figur 13) ligger i samma storleksordning. Dock är underlaget för simuleringen betydligt mer begränsat för Sveaskog. Även för data från Sveaskog kan man skönja en bimodal fördelning av fiberbredd.



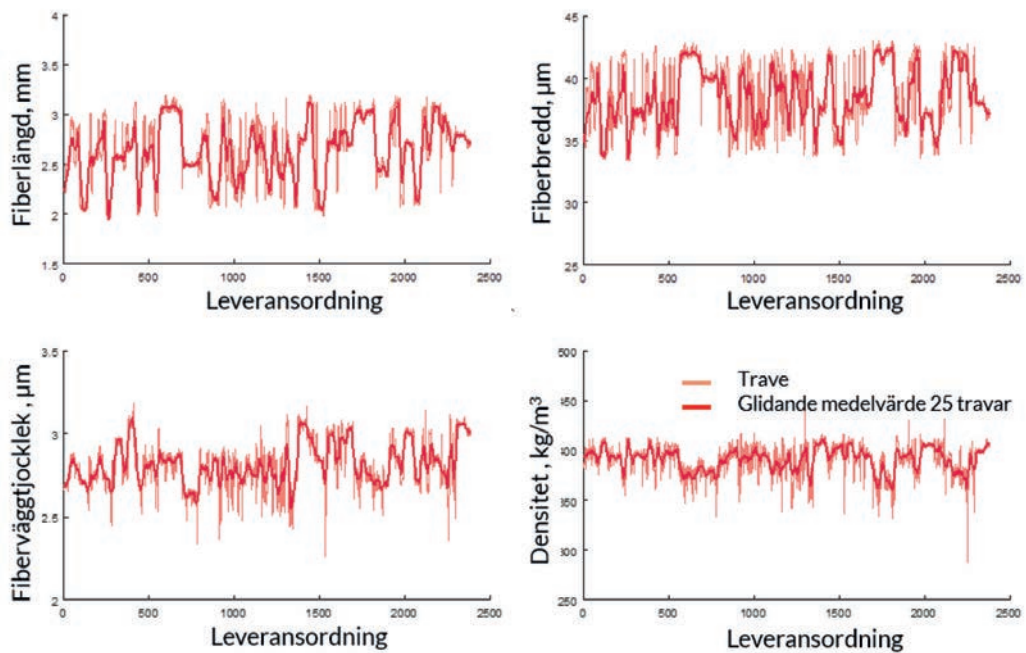
Figur 11. Figuren visar medelvärden för enskilda simulerade vedtravar för SCA Skogs leveranser till Östrand, presenterade för sextimmarsintervall (fyra värden per dygn). Varje trave har en volym om 15 m³. Medelvärdena för fiberlängd, -bredd, -vägg tjocklek samt densitet har beräknats för varje simulerad vedtrave. Simuleringen omfattar drygt 35 dagar. De mörkare röda punkterna är volymviktade medelvärden för alla simulerade travar per sextimmarsintervall.



Figur 12. Figuren visar medelvärden för enskilda simulerade vedtravar för SCA Skogs leveranser till Östrand. Varje trave har en volym om 15 m³. Medelvärden per simulerad vedtrave för fiberlängd, bredd, -vägg tjocklek samt densitet har beräknats. Simuleringen omfattar knappt 7000 travar. Den tjockare linjen visar det flytande medelvärdet för 25 travar.

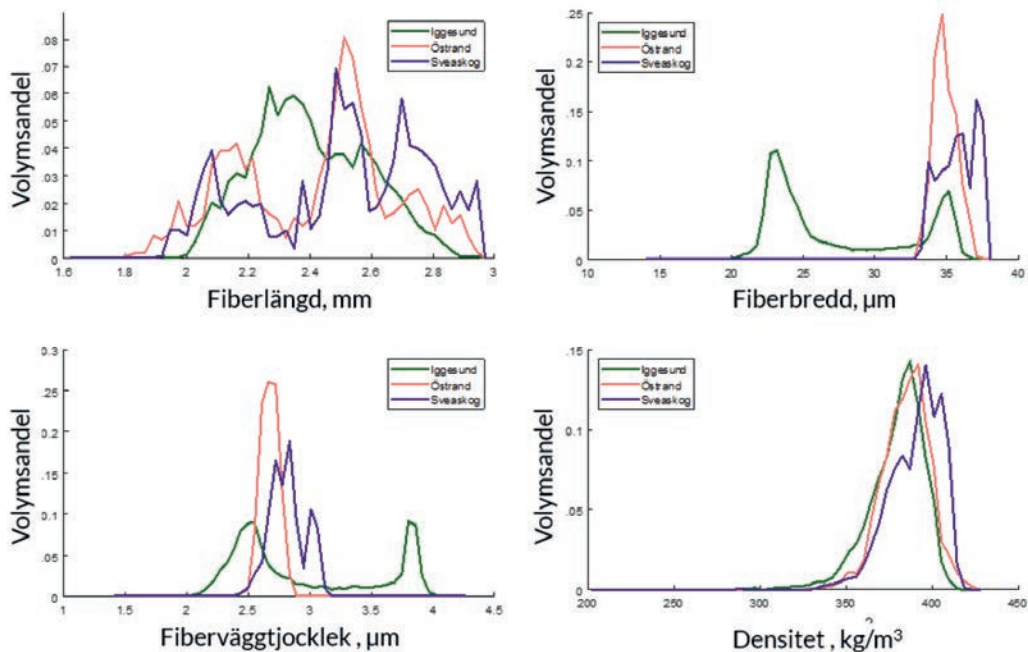


Figur 13. Figuren visar medelvärden för enskilda simulerade vedtravar för Sveaskogs leveranser till Östrand, presenterade som travar per sextimmarsintervall. De mörkare röda punkterna är volymviktade medelvärden för alla simulerade travar i ett sextimmarsintervall. Varje trave har en volym om 15 m³. Medelvärden för fiberlängd, bredd, -vägg tjocklek samt densitet har beräknats för varje simulerad vedtrave. Simuleringen omfattar drygt 18 dagar.



Figur 14. Figuren visar medelvärden för enskilda simulerade vedtravar för Sveaskogs leveranser till Östrand. Varje trave har en volym om 15 m^3 . Medelvärden per simulerad vedtrave för fiberlängd, bredd, -väggjocklek samt densitet har beräknats. Simuleringen omfattar knappt 2400 travar. Den tjockare linjen visar det flytande medelvärde för 25 travar.

Även volymviktade fördelningar har beräknats för leveranserna till Östrand och jämförts med leveranserna till Iggesund (Figur 15). I den typen av representationer förlorar man möjlighet att studera variabilitet över tiden. Fördelen är att variationer i egenskaperna tydliggörs.



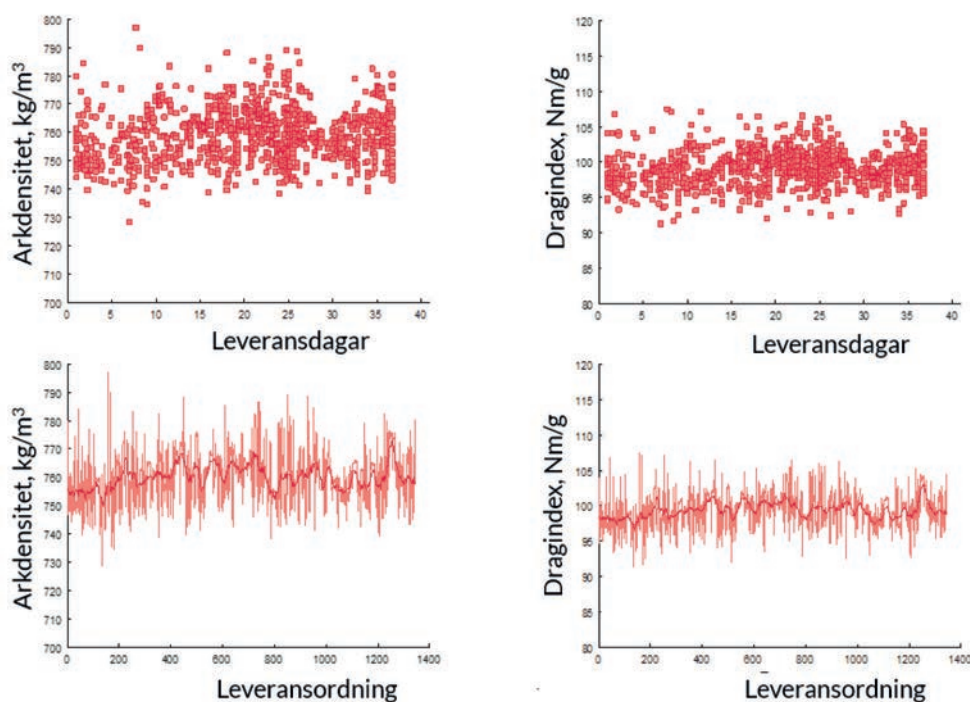
Figur 15. Volymviktade fördelningar för fiberlängd, -bredd, -väggjocklek och densitet.

Många intressanta aspekter framträder i volymfördelningarna. Fiberbredden för Iggesund (för detaljer, se resultaten för fallstudie III) är extremt bimodal. Likaså är fibervägg tjockleken tydligt bimodal. Fiberlängdsfördelningen för Östrand har två toppar, och för Sveaskogveden finns det tre toppar. Östrand har ved från både egen skog från nedre Norrland och ved från Småland (Sveaskogleveranserna). Man kan förvänta sig att smålandsveden som levereras till Östrand är mer varierande i fiberlängd och har fibrer som är bredare och tjockväggigare jämfört med den ved som kommer från det normala försörjningsområdet. Densiteten är dessutom något högre för smålandsveden.

De resultat vi har räknat fram här är inte allmängiltiga då dessa data är ögonblicksbilder som bara gäller för de avverkningar som är gjorda nu. Det går inte att dra några slutsatser om att veden från Iggesund generellt sett har högre variabilitet än Östrand. Det är dock rimligt att anta att det kommer att vara variationer i samma storleksordning, men då egenskaperna är beroende av ålder och vedslag, kommer de resulterande variationerna att förändras över tiden. En ny simuleringsperiod kan mycket väl visa att veden till Östrand har högre variation än veden till Iggesund. Det är just därför den det är värdefullt med digitaliserade vedflöden. Det bör dock finnas systematiska skillnader mellan ved från Östrands och Iggesunds områden, alltså nedre Norrland, och den ved som kommer via Sveaskog från Smålandsområdet.

Simulering av arkegenskaper

Simulering av arkegenskaper gjordes för arkdensitet och dragindex. På travnivå ligger variationen i arkdensitet mellan 730 till 800 kg/m³, och för dragindex mellan 90 och 110 Nm. På samma sätt som tidigare visas två typer av grafer. Simuleringen i Figur 16 representerar travar per dag och travarna mot travnummer. Det ger en bild av hur variationer i arkdensitet kan variera mellan 750 och 770 kg/m³, vilket motsvarar ca ±1,5 procent. Variationerna kan vara rätt snabba. Inom ca 15–20 timmar kan det glidande medelvärde gå mellan min- och maxnivåerna. För dragindex är variabilitet liknade när det gäller tidsförloppen, medan variationernas amplitud är något högre, ca ± 2 procent.



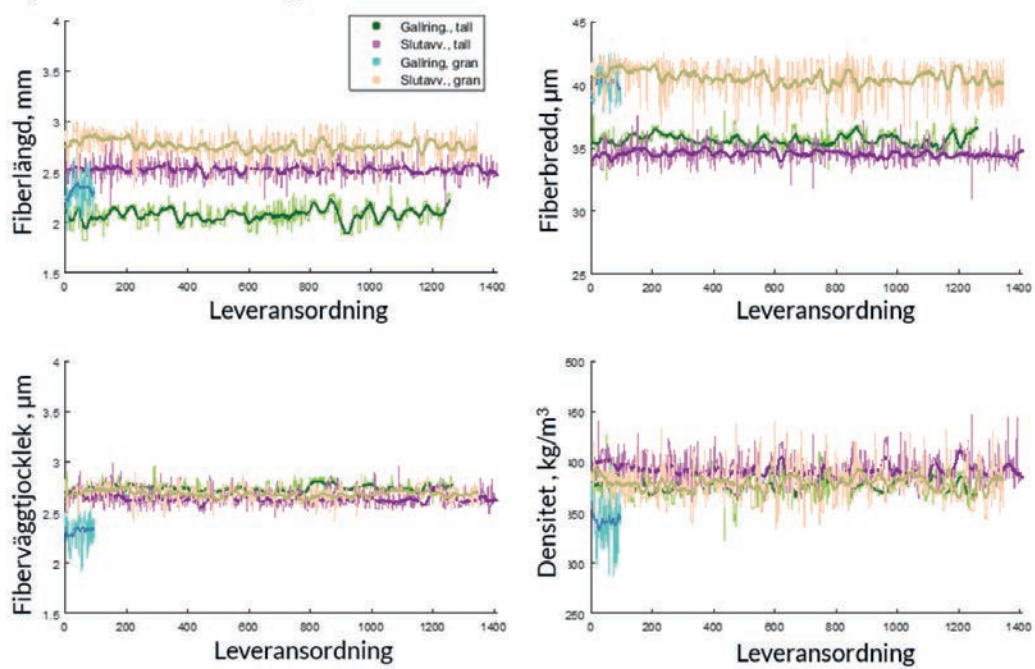
Figur 16. Figuren visar variationer i arkdensitet och dragindex per enskild trave ved levererad till Östrand. För de två övre Figurerna visas travar mot sextimmarsintervall, för de två nedre Figurerna mot leveransordning av travarna.

Simulering av ved av olika avverkningstyp

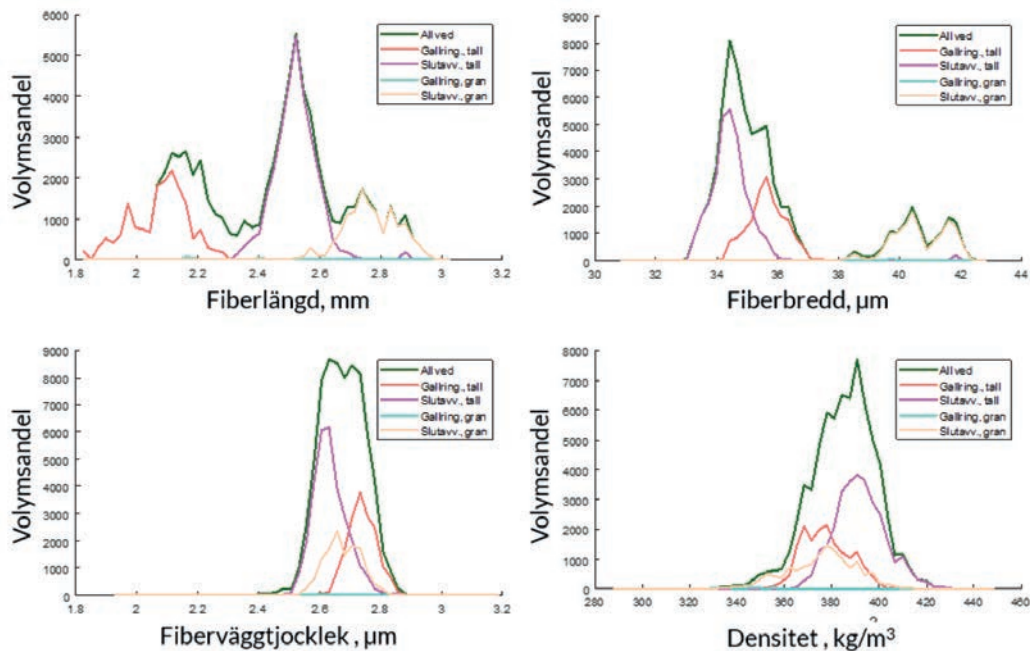
Syftet med att dela upp i avverkningstyper är primärt inte att åskådliggöra möjligheter med styrning av vedflöde. Det är istället en illustration över hur det naturligt kan variera om andelen till bruket levererad ung och gammal skog varierar över tiden. Variationer orsakade av avverkningsålder kan uppstå beroende på hur åtkomlig skogen är för avverkning, till exempel beroende på årstid och tjäle, vilket påverkar skogsbilvägarnas skick och hur man kommer åt avverkningsplatserna.

I de beräkningar som gjordes här sattes en gräns för gallring vid 40 år och för slutavverkning vid 80 år. Travar delades upp i två klasser baserat på avverkningsplatsens ålder samt om det var en gran- eller tallskog. De travar och flöden som då uppstod jämfördes och utvärderades.

I Figur 17 visas variationer per trave för de fyra huvudklasserna gallring gran, slutavverkning gran, gallring tall och slutavverkning tall. I Figur 18 visas volymviktade fördelningar.

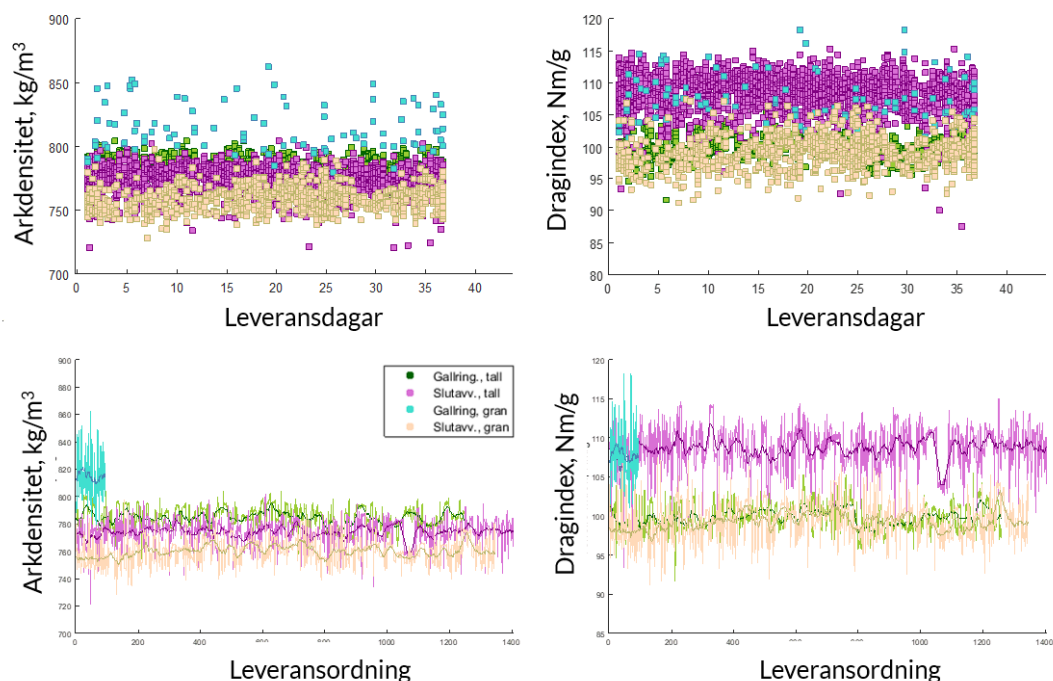


Figur 17. Figuren visar medelvärden per trave, i leveransordning för simulerade vedtravar av olika avverkningstyp. Varje trave har en volym om 15 m³. Medelvärden är beräknade för fiberlängd, -bredd, -vägg tjocklek samt densitet. Den tjockare linjen visar ett flytande medelvärde för 25 travar.



Figur 18. Volymviktade fördelningar för fiberlängd, -bredd, -vägg tjocklek och densitet för gallring och slutavverkning för gran respektive tall.

Simulering av arkegenskaper finns redovisade i Figur 19. Utmärkande för denna är den avvikande arkdensiteten för gallring gran. Det beror på att fibrerna är tunnväggiga, kollapsar lätt och ger ett slätt och kompakt ark. Lägst arkdensitet (och högst bulk) ger slutavverkning gran. Dragindex ligger högst för gallring gran och slutavverkning tall.



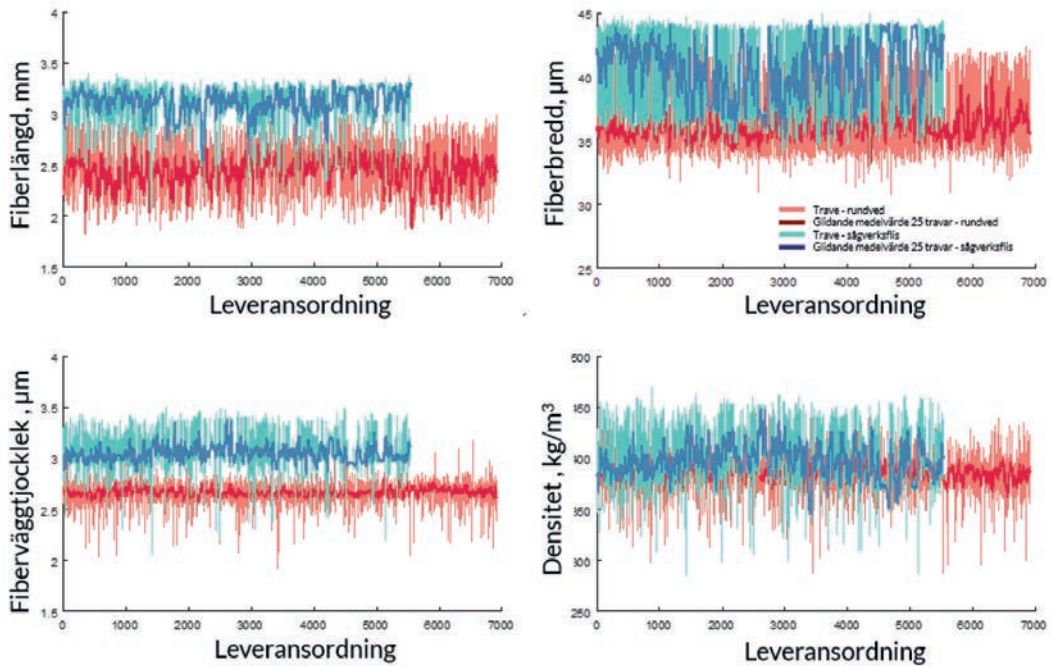
Figur 19. Medelvärden per trave för simulerade vedtravar av olika avverkningstyp. Medelvärden för arkdensitet och dragindex har beräknats. Varje trave har en volym om 15 m³. För de två övre figurerna visas travar per sextimmarsintervall, för de två nedre figurerna mot travarnas leveransordning. Den tjockare linjen visar ett flytande medelvärde för 25 travar.

Simulering av sågverksflis

De modeller för beräkning av sågverksflisens egenskaper och som beskrivs i Material och metod fanns inte tillgängliga när simuleringarna av sågverksflis för Östrand gjordes. En enkel modell för skattning av ved- och fiberegenskaper för sågverksflis användes i stället. Modellen baserades på tidigare simuleringar av timmerstockar och sågverksflis som gjordes på RISE Innventia i mitten av 00-talet. Beräkningarna bygger på "Forest resource database" (Lundqvist m.fl. 2008). Det är en databas med simulerade träd och skogar som täcker hela Sverige och simulerades baserat på Riksskogstaxeringens data.

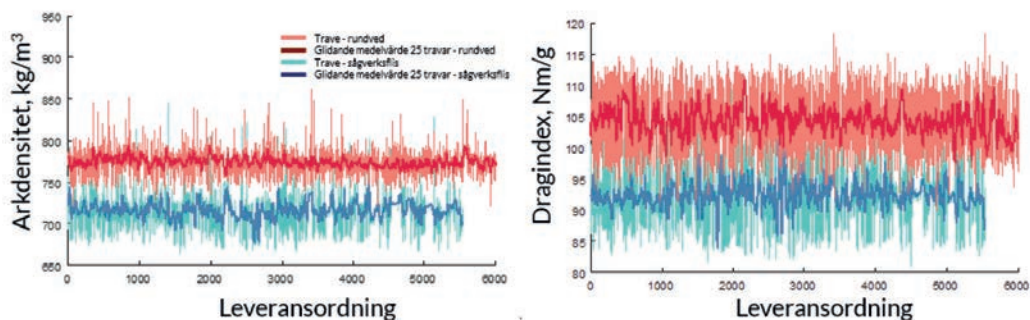
I simuleringarna gjordes beräkningar för sågutbytesdelen och sågverksflisdelen separat. Genom att använda de beräkningarna togs i detta projekt en enkel modell fram för hur fiberegenskaperna i sågverksflisen i en stock förhöll sig till flisegenskaperna i hela timmerstocken. Modeller för sågverksflis av gran och tall togs också fram. Vår bedömning är att trots att beskrivningen är mycket förenklad så ger den ändå en rimlig fingervisning om vad man kan förvänta sig för egenskapsskillnader mellan rundveden och sågverksflisen, samt inom sågverksflisen.

I Figur 20 visas skillnaden i fiberegenskaper för sågverksflis och rundved. För samtliga egenskaper erhålles väsentligt högre värden för sågverksflisen. Fiberdimensionerna för sågverksflis är 10–30 procent högre. Störst är skillnaden för fiberlängd. Ytterligare extrema skillnader förväntas om man även tar hänsyn till vedens ursprung såsom vedslag och avverkningsålder. Tallsågverksflis från gammal skog har vanligen mycket tjockväggiga fibrer som kan vara utmärkta i produkter där svårkollapsade fibrer önskas. Men i de simuleringar som redovisas här begränsas uppdelningen av sågverksflisflöden till att enbart omfatta flistyp och någon ytterligare fördjupning genomfördes inte.



Figur 20. Medelvärden per trave för simulerade rundvedstravar respektive sågverksflis. Varje trave har en volym om 15 m³. Medelvärden beräknade för fiberdimensioner och densitet har beräknats. Den tjockare linjen visar ett flytande medelvärde för 25 travar.

Eftersom fiberegenskaperna i rundved respektive sågverksflis är så olika är det rimligt att man också uppnår stora skillnader i arkegenskaper. I Figur 21 illustreras detta. Arkdensiteten är betydligt lägre för de grova fibrerna. Variationerna i arkdensitet mellan travar är högre för sågverksflisen jämfört med rundveden. Dragindex ligger också lägre, men här är variationerna för rundveden större mellan travarna.



Figur 21. Medelvärden per trave, i leveransordning för simulerade rundvedstravar respektive sågverksflis. Varje trave har en volym om 15 m³. Medelvärden beräknade för arkdensitet och dragindex har beräknats. Den tjockare linjen visar ett flytande medelvärde för 25 travar.

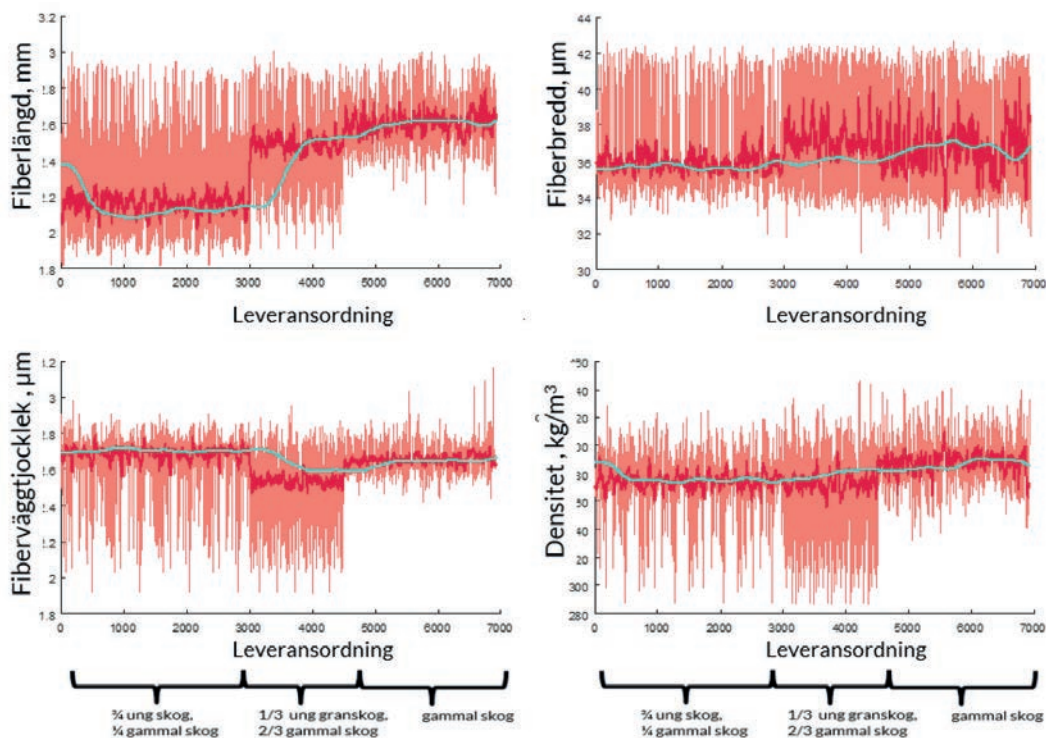
Simulering av flisstacken

Vedflödena till Östrand användes också för att illustrera simuleringen av en flisstack. En flisstack initierades. Volymen i stacken angavs till 10 000 m³ och in- och utflöde sattes till 2000 m³, vilket motsvarar ca 140 travar per dygn. Som startvärde på ved- och fiberegenskaper i flisstacken användes volymviktade medelvärden på inkommande ved för hela perioden.

Inkommande vedflöde till flisen modifierades. Det simulerade vedflödet följer inte avverkningstidpunkt i detta fall, i stället skapades ett nytt flöde till flisstacken modifierat baserat på vedens egenskaper. Motivet till detta är att skapa en dynamik i flisen. På så sätt blir effekterna av flisstackens dämpningsdynamik tydligare. Simuleringen bygger på skapade variationer i ålder på veden enligt följande:

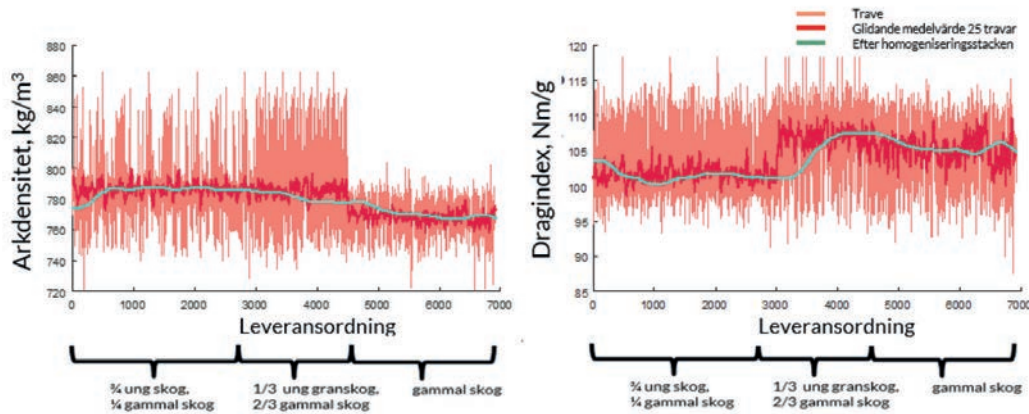
- Trave 1–3000 (0 till 21 h): Var fjärde trave från gammal skog, resten ung skog
- Trave 3000–4500 (21 till 32h): Var tredje trave från ung gran, resten gammal skog
- Trave 4500–6500 (32 till 50h): Gammal skog

I Figur 22 visas hur ved- och fiberegenskaper varierar i utflödet från flisstacken. Totalt representerar simuleringen knappt 50 timmar. Resultatet från simuleringen illustrerar hur väl högfrekventa variationer dämpas i stacken. Man ser också hur variationerna i råvarumix på grund av åldersskillnad i avverkad skog slår igenom på egenskaper ut från flisstacken. När fördelningen gammal skog (trave 1–3000) går från 25 procent till 67 procent (trave 3000–4500) medför det en ökning med ca 20 procent i fiberlängd. Uppgången i fiberlängd tar ca sju timmar från det att råvarumixen förändras efter 3000 travar. För fibervägg tjocklek är förändringen ca -5,5 procent och för fiberbredd ca 2,5 procent.



Figur 22. Medelvärden per trave för simulerad rundved efter flisstack i leveransordning. Varje värde representerar medelvärdet för en mängd motsvarande en vedtrave om 15 m³. Den blå linjen visar ett flytande medelvärde för en mängd motsvarande 25 vedtravar.

I Figur 23 visas effekten på arkegenskaperna. Arkdensiteten minskar med ca 1,5 procent i den första omställningen och ytterligare ungefär lika mycket i den andra förändringen av råvarumixen. Dragindex ökar med nästan fem procent vid den första och minskar ca två procent vid den andra. Effekterna på arkegenskaperna är av sådan storlek att det motiverar förändringar i processen för att hantera dem.



Figur 23. Medelvärden per mängd motsvarande en vedtrave för simulerad rundved efter flisstack. Varje värde representerar en flismängd motsvarande en vedtrave om 15 m³. Medelvärden är beräknade för arkdensitet och dragindex. Den tjockare linjen visar ett flytande medelvärde för en flismängd motsvarande 25 vedtravar.

FALLSTUDIE II: SCA BOLLSTA

Skattade variationer i fiberegenskaper hos sågverksflis baserat på stocktyp

Som beskrivits under Material och metod ovan var det inte praktiskt möjligt att direkt från sågverkens röntgenmätramar skatta flisegenskaperna. Det är däremot möjligt att utifrån andra, makroskopiska, mätbara egenskaper skatta fiberegenskaperna i olika stocktyper och därigenom approximera fiberegenskaperna i flisen. De mätbara egenskaperna inkluderar exempelvis stocktyp (rotstock eller ej), kärnvedsandel, kvistvarvsavstånd, densitet, årsrings-bredder och friskkvistighet.

I vårt exempel har vi valt att dela in stockarna i tre grupper utifrån diameter och stocktyp, det vill säga rotstock eller inte rotstock samt friskkvistförekomst. En grupp består av rotstockar med toppdiameter över 25 cm, en grupp består av icke rotstockar med friska kvistar och en toppdiameter mindre än 17 cm och en grupp med "resten". Grupperingen har gjorts för att få en rimlig, praktisk uppdelning, som troligen är möjlig för sågverket att hålla ordning på.

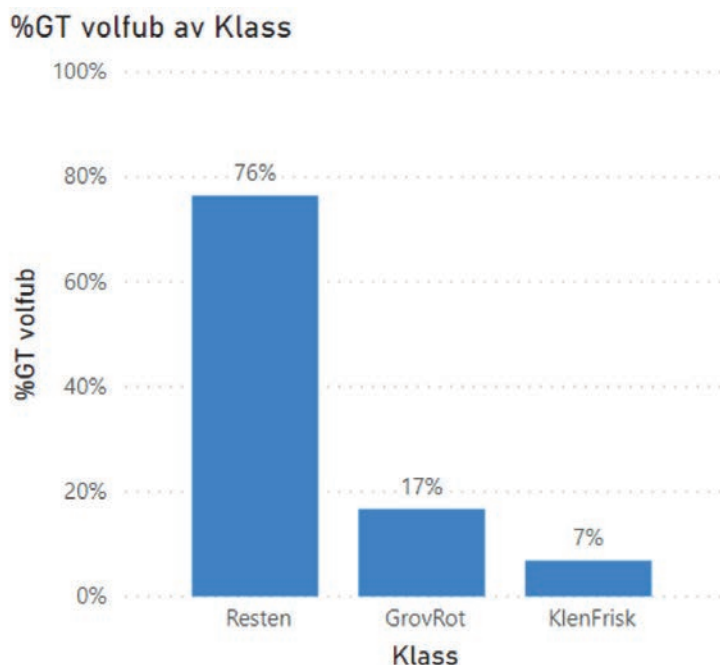
Diagrammen nedan visar volymandelen (Figur 24) i de olika klasserna, samt medelvärdena på cellväggstjockleken (Figur 25), cellbredden (Figur 26), fiberlängden (Figur 27) och densiteten (Figur 28).

Volymen som anges är andelen av den totala timmervolymen angiven som m³fub. Det är alltså inte andelen av den producerade flisvolymen, för den är avhängig bland annat postningsmönstren som vi inte har tillgång till. Egenskaperna som anges gäller inte bara för splintveden/sågverksflisen, utan även för hela stocken. Det gör att de absoluta värdena inte är korrekta, men relationerna mellan klasserna bedöms vara rimliga.

Den största volymen finner man i detta fall i "resten". Även de grova rotstockarna ger ett stort bidrag till volymen, medan de klena friskkviststockarna inte bidrar med så mycket.

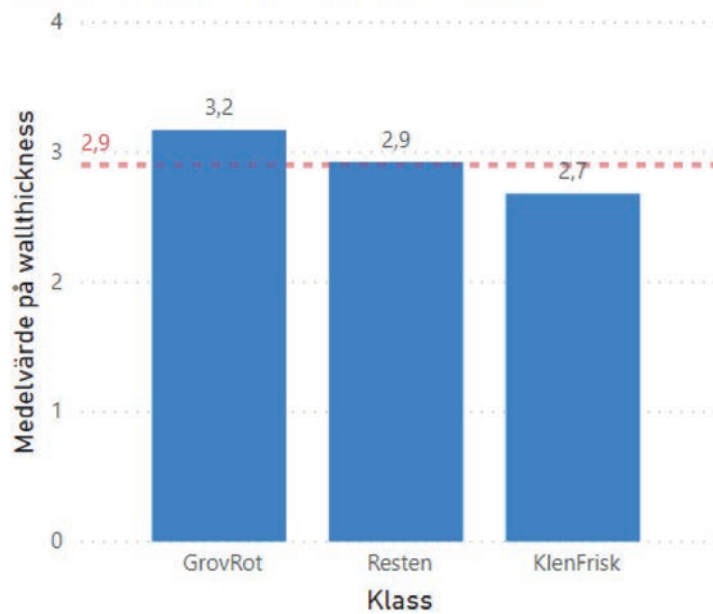
Diagrammen nedan indikerar de olika flisegenskapernas relation till varandra i de tre olika timmerklasserna. Naturligtvis kan man separera ytterligare i timmerklasserna, men effekterna av detta ska då ställas i relation till den ökande hanteringen och kontrollbehovet.

De skillnader i egenskaper som redovisas mellan klasserna i diagrammen indikerar vilken variation i egenskaper som en kvalitetsdeklaration av sågverksflisen kan ge. En deklaring av kvalitetsegenskaper innefattar i ett första steg endast en digitalisering av dataflödet. Om det blir önskvärt att särhantera vissa fliskvaliteter kan nya rutiner i logistiken för flishantering behövas. Noterbart är att både för torr-rådensiteten och för fibervägg tjockleken indikerar diagrammen en variation mellan klasserna på mer än tio procent. Det är två egenskaper med stor inverkan på processer och produktenskaper.



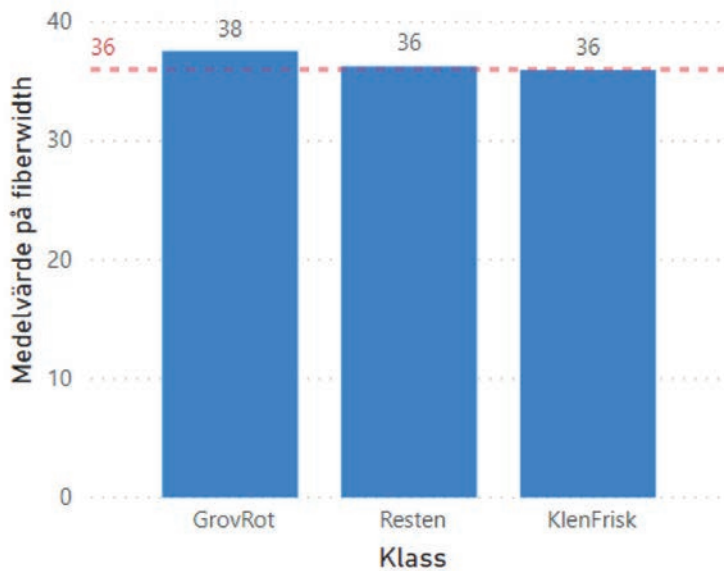
Figur 24. Figuren visar volymfördelningen i de olika klasserna, uppdelat på "Grova rotstockar", "Klena friskkviststockar, ej rot" och resten.

Medelvärde på wallthickness av Klass



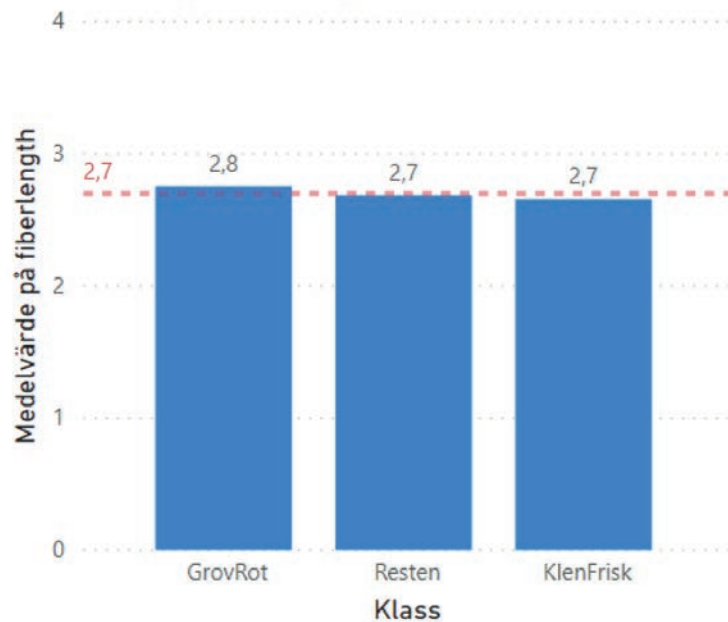
Figur 25. Figuren visar medelvärdet på cellväggstjockleken, i μm , i de olika klasserna, uppdelat på "Grova rotstockar", "Klena friskkviststockar, ej rot" och resten. Den streckade linjen visar det totala medelvärdet

Medelvärde på fiberwidth av Klass



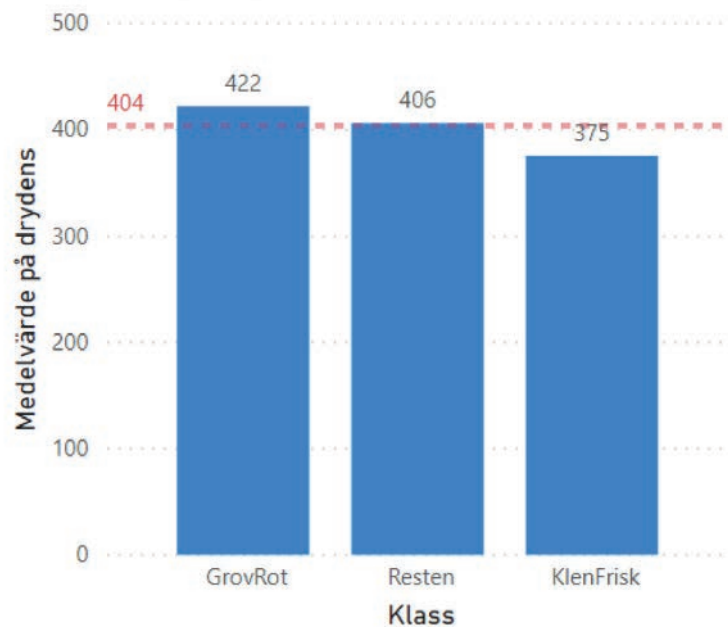
Figur 26. Figuren visar medelvärdet på cellbredden, i μm , i de olika klasserna, uppdelat på "Grova rotstockar", "Klena friskkviststockar, ej rot" och resten. Den streckade linjen visar det totala medelvärdet.

Medelvärde på fiberlength av Klass



Figur 27. Figuren visar medelvärdet på fiberlängden, i mm, i de olika klasserna, uppdelat på "Grova rotstockar", "Klena friskkviststockar, ej rot" och resten. Den streckade linjen visar det totala medelvärdet.

Medelvärde på drydens av Klass



Figur 28. Figuren visar medelvärdet på torr-rådensiteten i kg/m^3 i de olika klasserna, uppdelat på "Grova rotstockar", "Klena friskkviststockar, ej rot" och resten. Den streckade linjen visar det totala medelvärdet.

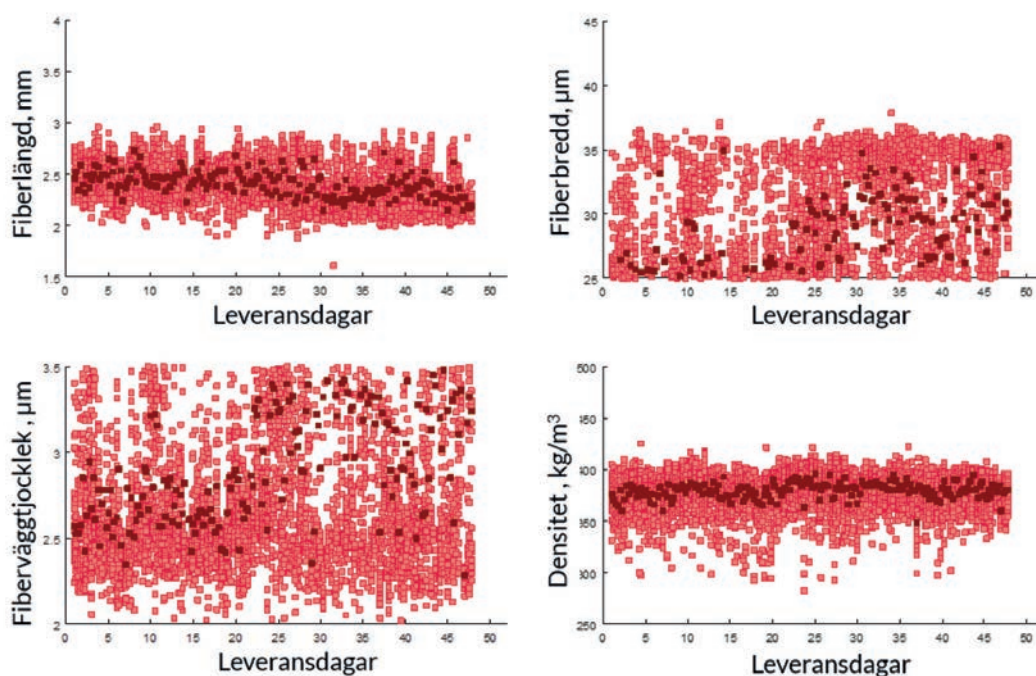
FALLSTUDIE III: HOLMEN IGGESUND

Vedflöden till Iggesund

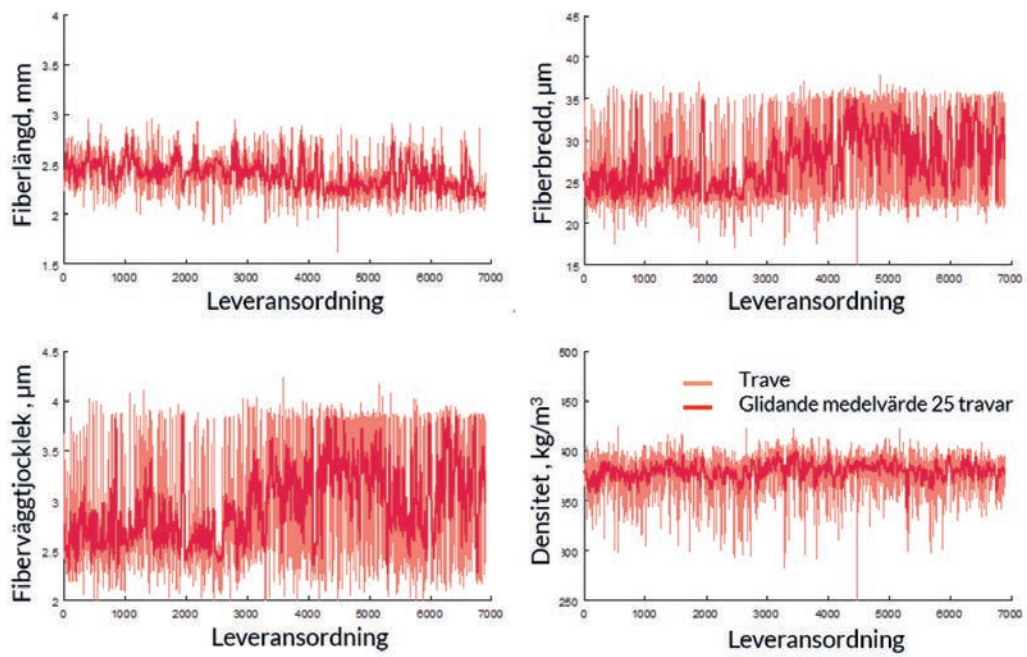
En stor del av massaveden till Iggesund levereras av Holmen Skog. I Tabell 2 finns data om omfattningen av veden från Holmen skog som har inkluderats i denna studie.

Resultatet från simuleringen bygger på ett vedflöde motsvarande ca 48 dagar och omfattande ca 7000 travar.

Veden till Iggesund har betydligt större variationer än den som levererats till Östrand (Figur 29). Det gäller särskilt fibervägg tjockleken, men även för fiberbredden finns en stor variation. Fiberlängden uppvisar dock en något mindre variation. Man kan ana bimodala fördelningar för både fiberbredd och fibervägg tjocklek. För Iggesund finns över tid en tydlig förändring av fiberbredd och fibervägg tjocklek. Andra halvan av simuleringsserien har betydligt bredare och tjockväggigare fibrer.



Figur 29. Figuren visar medelvärden för enskilda simulerade vedtravar presenterade per sextimmarsintervall. De mörkare röda punkterna är volymviktade medelvärden för alla simulerade travar per sextimmarsintervall. Varje trave har en volym om 15 m³. Medelvärden för fiberlängd, -bredd, -vägg tjocklek samt densitet har beräknats för varje simulerad vedtrave. Simuleringen omfattar drygt 48 dagar.



Figur 30. Figuren visar medelvärden för enskilda simulerade vedtravar. Varje trave har en volym om 15 m³. Medelvärden per simulerad vedtrave för fiberlängd, bredd, -väggjocklek samt densitet har beräknats. Simuleringen omfattar knappt 7000 travar. Den tjockare linjen visar det flytande medelvärdet för 25 travar.

Resultat och diskussion del 2:

Demonstration av digitala egenskapsdeklarationer i två systemmiljöer

För att demonstrera möjligheterna med digitala egenskapsdeklarationer och hur de skulle kunna se ut i ett framtida system tog projektet fram två demonstratorer. Demonstrator A byggdes hos Biometria i samarbete med Holmen och demonstrator B byggdes i Sveaskogs egna system. De båda demonstratorernas uppbyggnad och huvudsakliga erfarenheter från uppbyggnad och testkörningar finns beskrivna nedan.

DEMONSTRATOR A: BIOMETRIA OCH HOLMEN

Uppbyggnad av demonstratorn

En demonstrator baserad på en MS Power BI demonstrerades för Holmen baserat på skördardata från egen skog avverkad under första halvåret 2019. Biometria har pågående projekt där man bygger upp ett datalabb med syftet att enklare tillgängliggöra data från den skogliga digitala kedjan. Data till detta projekt har därför hanterats i den struktur som håller på att byggas upp för att stödja datalabbet.

För att bestämma vilka egenskaper som skulle testas i demonstratorn genomfördes workshops med Holmen Skog och Iggesunds bruk. Under dessa workshops diskuterades även vilka egenskaper som var möjliga att utvärdera med data från bruket. Det beslutades dock att det var lämpligt att inkludera samtliga egenskaper som var möjliga att beräkna med demonstratorn för att visa på potentialen med egenskapsberäkningar. De egenskaper som prioriterades för redovisning var:

- Rådensitet (green density)
- Torr-rådensitet (basic density)
- Fiberlängd
- Fiberväggstjocklek
- Trädslag (baserat på skördardata)
- Färskhets (lagringstid från avverkningstillfälle till inmätning vid industri)
- Geografiskt ursprung (kartbild)

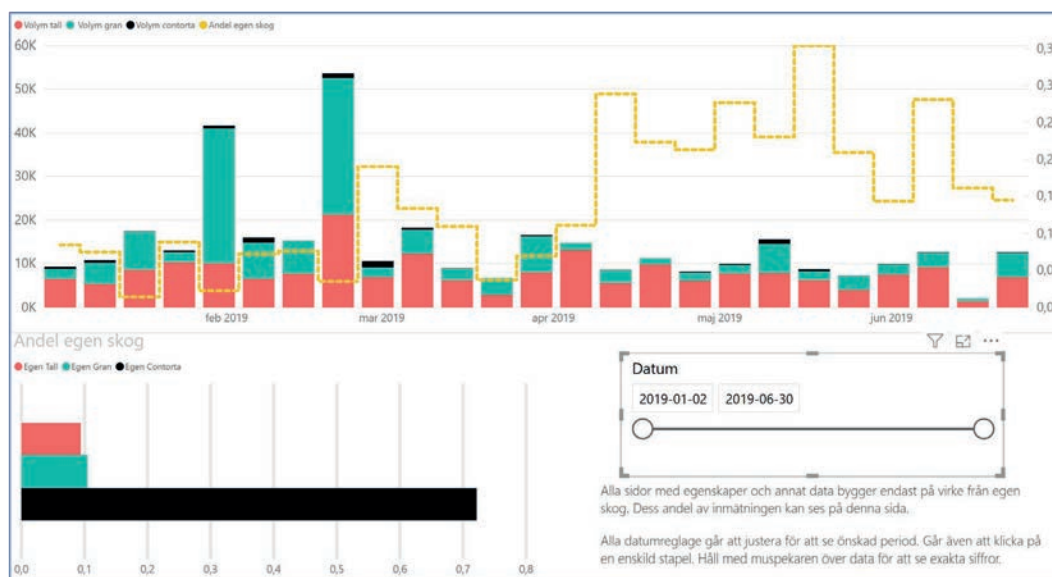
För att kunna bygga demonstratorn användes data från tre olika källor;

1. Mätdata från inmätningen av virkesleveranser vid ankomst till Iggesunds bruk
2. Skogsdata från Holmens beståndsregister
3. Skördardata från avverkningen av bestånd på Holmens egen skog där virke levererats till Iggesund under undersökningsperioden

Skördardata kördes igenom Skogforsks program hprCM samt Propps (kompletterat med beståndsålder och höjd över havet från Holmens beståndsregister) för att beräkna egenskapsdata för varje enskild stock som sedan lagrades i en databas. För att i nästa steg bygga själva demonstratorn skapades volymviktade medelvärden för egenskaperna per varje avverkning utifrån skördardata. Detta kopplades sedan ihop med inmätningensdata,

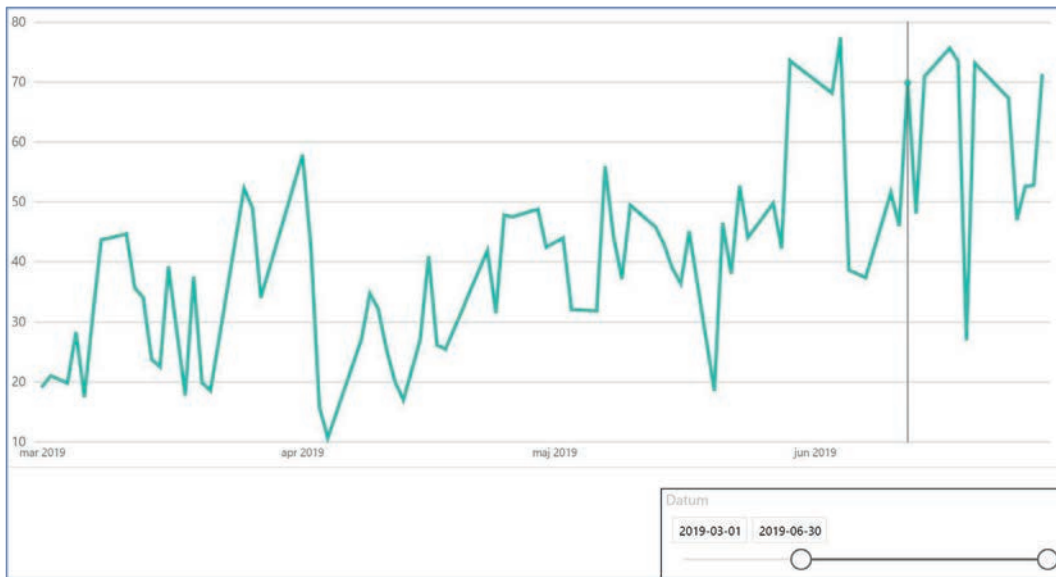
där de volymviktade egenskaperna per avverkning volymviktades på nytt till dagsvärden vid Iggesunds bruk utifrån hur mycket som levererats från respektive avverkning per dag. Ett släpande medelvärde för egenskaperna beräknades för 4, 5, 15 och 30 dagar för att jämna ut eventuella avvikande värden inmätta enstaka dagar. Tiden från inmätning tills att veden går in i massaprocessen är vanligen 1–3 dagar. Resultatet kunde sedan presenteras i en Power BI-rapport (se exempel i Figur 31, Figur 32, Figur 33 och Figur 34).

Totalt mättes 359 158 m³fub in vid Iggesunds bruk under perioden, varav 41 255 m³fub (11 procent) kom från den egna skogen och därmed utgjorde den volym för vilken egenskaper kunde beräknas. Figur 30 visar den totala inmätta volymen barmassaved (fördelad på trädslag) vid Iggesunds bruk samt hur andelen från egen skog varierade under första halvåret 2019.



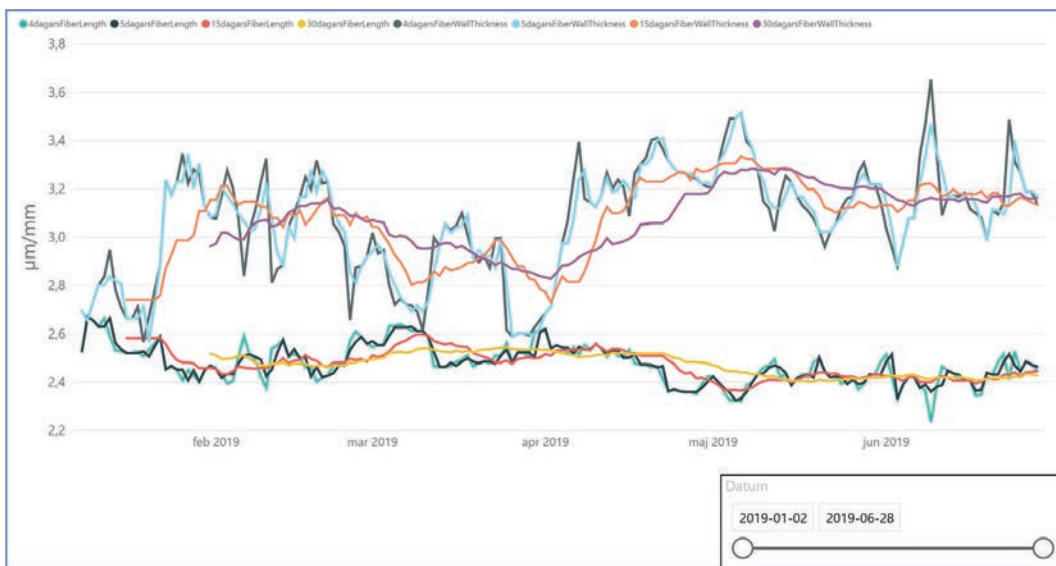
Figur 31. Total inmätt volym barmassaved per trädslag vid Iggesunds bruk samt andelen egen skog (gul linje) under första halvåret 2019.

Ur demonstratorn var det sedan möjligt att filtrera fram olika tidsperioder och exportera data för vidare analyser. Figur 32 visar tiden mellan påbörjad avverkning och inmätning för leveranserna till Iggesunds bruk från 1 mars till 30 juni 2019.



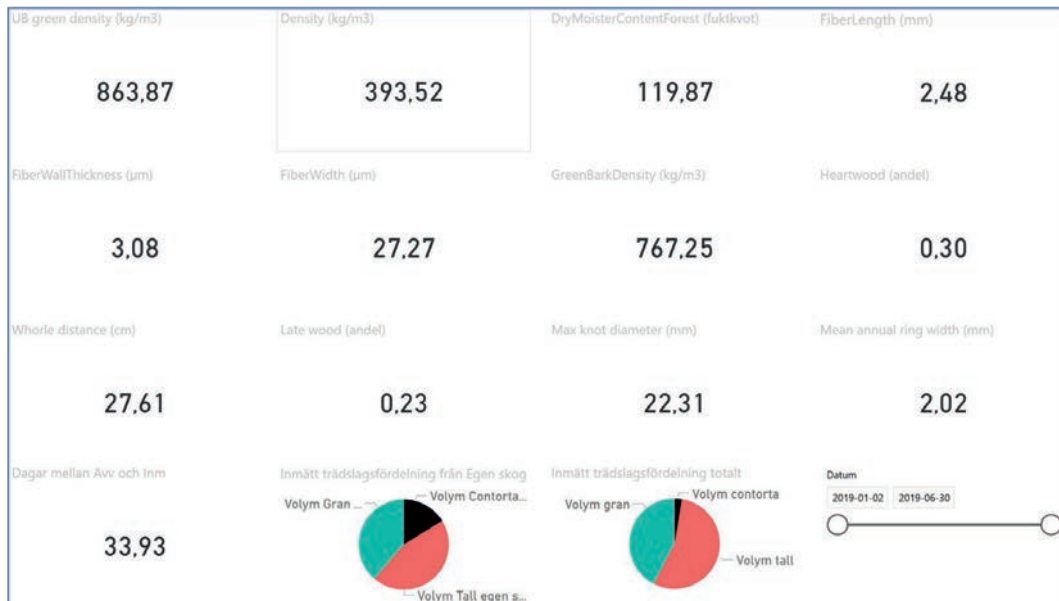
Figur 32. Antal dagar (viktat medelvärde) mellan första avverkningsdag och inmätning för leveranserna till Iggesund bruk under perioden mars–juni 2019.

För fiberlängd och fibertjocklek redovisades rullande medelvärden för några olika tidsperioder (Figur 33) under första halvåret 2019. Anledningen till rullande medelvärden var ett försök att hantera det faktum att det i dagsläget är okänt hur länge varje massavedsleverans blir liggande på vedgården. Enligt Iggesunds bruk konsumeras den dock oftast inom ett par dagar efter ankomst. De rullande medelvärdena visar samma övergripande svängningar över tid även om skillnaderna jämnades ut ju längre tidsperioden blev, vilket var förväntat. Skillnaden i genomsnittliga värden för både fiberlängd och fibertjocklek mellan första och andra kvartalet är sannolikt kopplad till den större andelen gran under första kvartalet jämfört med andra kvartalet.



Figur 33. Rullande medelvärde för fiberlängd och fiberväggstjocklek i leveranserna till Iggesunds bruk från Holmens egen skog för olika långa tidsperioder under första halvåret 2019.

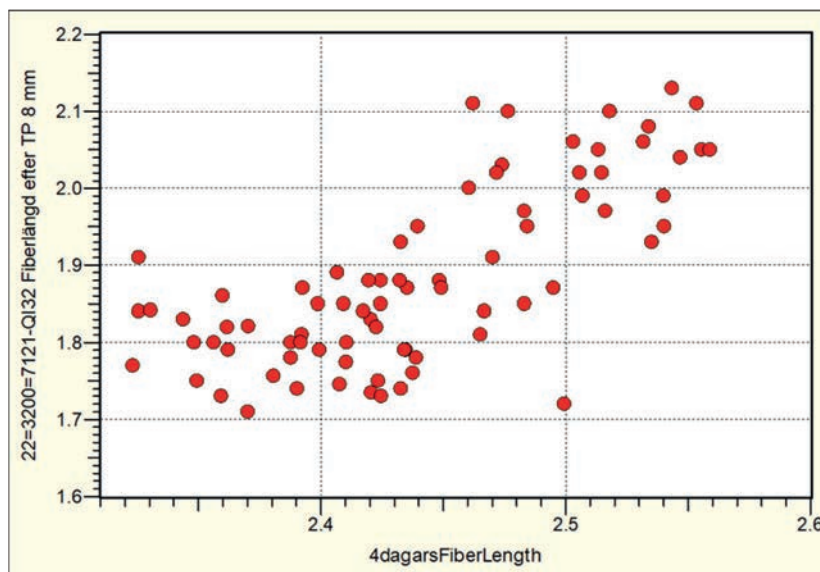
Det fanns även möjlighet i demonstratorn att enkelt och översiktligt redovisa medelvärden för samtliga beräknande egenskaper över valda delar av halvåret (Figur 34).



Figur 34. Sammanställning av alla beräknande variabler i demonstratorn över valfri period. I figuren är perioden hela första halvåret 2019.

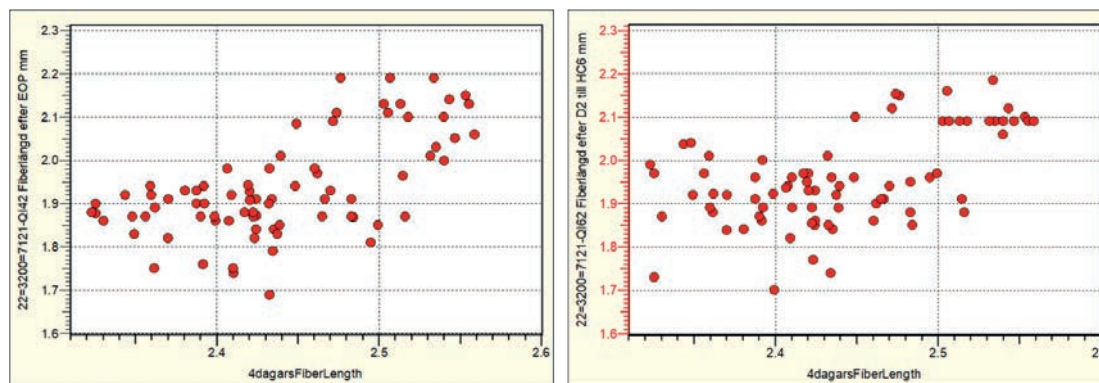
Erfarenheter från testkörning och koppling mot data från industrin

Utvärderingen av demonstratorn för Iggesunds bruk genomfördes av Holmen och då jämfördes beräkningarna av fiberlängden med uppmätta värden under massproduktionen vid samma tidsperiod. Släpande medelvärden över fyra dygn användes för att jämma ut beräknade egenskaper. Utvärderingen gjordes efter tre olika processteg (här processteg 1–3). Steg 1 tidigt i processen uppvisade starkast samband (Figur 35). Anledningen till att skalorna på x- och y-axeln är olika är troligtvis en systematisk förskjutning i antingen uppmätt värde eller beräknat värde.



Figur 35. Korrelation mellan beräknad och uppmätt fiberlängd efter processteg 1.

Korrelationen försämrades efter efterföljande processteg vilket kan förklaras av en sammanblandning av fibrerna i processen (Figur 36).



Figur 36. Korrelation mellan beräknade och uppmätta fiberlängder efter processtegen 2 (vill vänster) och 3 (till höger).

Den demonstrator som Biometria byggt baserat på MS Power BI var lättanvänd. Korrelationen mellan den beräknade fiberlängden och den som uppmättes efter de första processtegen var tillräckligt hög för att bedömas användbar som ett stickprov för fiberlängd, trots att det bara var cirka 11 procent av veden som hade en egenskapsdeklaration. För att utvärdera djupare och senare effekter i efterföljande processteg, exempelvis kopplat till kartongegenskaper, bedömdes att en högre andel av vedråvaran behövde egenskapsdeklaration.

En workshop hölls på Holmen för att visa på och diskutera resultaten med en bred representation av olika organisationsdelar. Där gavs även möjlighet att kommentera olika möjligheter och utmaningar med förbättrade egenskapsdeklarationer av vedråvaran i operativa flöden.

Demonstratorn har visat att det går bra att kombinera data från beståndsuppgifter, skördardata och inmättningsdata, vilket är ett viktigt steg framåt för att knyta ihop tillgängliga informationsflöden. Det som skulle krävas av gränssnittet inom organisationsdelarna på Holmen är framförallt tillgång till skogens genomsnittliga ålder per avverkning (beståndsålder i brösthöjd, dvs. angiven eller beräknad till referensen 1,3 m över marken) från Holmen Skog för avverkningsbåde på egen och andras mark. Uppgiften är redan idag möjlig att registrera i VIOL-systemet hos Biometria, men samlas vanligtvis inte in regelbundet för skog från andra markägare än Holmen. Åldersuppgiften kan sannolikt på sikt komma från fjärranalys och kan redan idag uppskattas via skördardata, men egenskapsberäkningarna blir bättre med bra beståndsåldersuppgifter.

I diskussionen konstaterades att detta var en första spännande tillämpning som kan leda till ändrade spelplaner framöver. Samtidigt kommer utmaningar i att ha koll på alla de stora flödena, vilket försvåras av dagens logistiklösningar som inkluderar till exempel terminalhantering och vedgårdens struktur. Vid Iggesund bruk produceras kartong, där målsättningen är att jämna ut vedvariationer för en så homogen massa som möjligt. Det är möjligt att egenskapsdeklarationer kan bli än mer intressant vid andra pappersbruk med intresse att styra hårdare mot särskilda egenskaper, exempelvis bruk som producerar till flera olika produktområden, som till exempel tryck- och förpackningspapper. Samtidigt konstaterades att det kommer att krävas branschsamarbeten för att få med egenskapsdeklarationer på en högre andel av den vedråvara som industrin

förbrukar, då få företag är helt självförsörjande på massaved. Informationen bör dessutom vara tillgänglig i nära realtid för att ge operativ nytta i styrningen av industriprocesser. Massabruken konsumerar även en hel del sågverksflis som då också bör egen-skapsdeklarerars för en fullständig bild av råvaran.

DEMONSTRATOR B: SVEASKOG

Uppbyggnad av demonstratorn

Demonstrator B byggdes på ett likande sätt som Demonstrator A, men i Sveaskogs eget företagssystem. Modulen Propps implementerades i systemet för att beräkna ved-egenskaper hos både timmer och massaved. Data till egenskapsberäkningarna hämtades från en databas med produktionsdata från skördare samt skogliga register för åldersupp-gifter.

Erfarenheter och fortsatt arbete

Implementeringen av Propps i Sveaskogs databas har fungerat bra och Sveaskog kan nu med befintliga egenskapsmodeller som baseras på skördardata och beståndsuppgifter om brösthöjdsålder på den avverkade skogen beräkna egenskaper på sina virkesleveranser. Tekniskt har det fungerat bra att få till en lösning.

Framöver önskar Sveaskog en dialog med industrin för att kunna ta fram de data som värdesätts av industrin gemensamt och av varje kund. Sveaskog önskar även att jobba vidare med utveckling av metoder för att omvandla stockdimensioner och beräknade egenskaper till produkter för att kunna beskriva/klassa de stockar som skördats på ett sätt som industrin lätt kan översätta till sin egen sortering/klassificering.

Sveaskog ser även potential i och behov av en fortsatt utveckling av digitala verktyg för bättre beslut och därmed ökat värdeskapande ur skogen.

Möjligheter och utmaningar med egenskapsstyrning

Nedan följer ett avsnitt där vi diskuterar vilka möjligheter och utmaningar som kan finnas i att styra på egenskaper i högre grad än idag vid skörd och hantering av skogens olika produkter och sortiment.

SÅGVERKSFLIS

Som nämnts i rapporten bör det vara möjligt för många sågverk att deklarerera egenskaperna hos den flis som levereras till ett massabruk. Det är troligen inte nödvändigt att dela in flisen i alltför många klasser, men egenskaperna och eventuell variation i flödet skulle ändå kunna beskrivas löpande. I vårt exempel hade vi tre grupper: grov rotstock, klen friskkviststock och övrig stock, men annan indelning är naturligtvis möjlig. Det bedöms i de flesta fall vara en tillräcklig uppdelning för att massaindustrin ska kunna tillgodogöra sig informationen. Om fler ”flisklasser” skapas finns en risk att det blir för omständligt, både för sågverken och för massaindustrin, så att hela indelningen och särskilningen kostar mer än den kan ge i förbättrad processtyrning. Eftersom flisdeklarationen är en ytterligare uppgift för sågverken som kan bidra till förbättrad processtyrning på massaindustrin, bör informationen kunna betinga ett värde, som massaindustrin kan vara villig att betala för. Detta är dock en fråga för förhandling, utifrån parternas respektive förväntade kostnader och intäkter.

I sågverket är det vanligaste att man sågar en timmerklass under ett antal timmar. Flisen hamnar i en flisficka, som töms efterhand (Figur 37 och Figur 38). Tömningen sker i vissa fall till en flisbil och i andra fall till en flishög bredvid. I de fall flisfickan töms för att lagra flisen i en hög bredvid finns stor risk att olika flistyper sammanblandas. I de fall flisen går via en ficka och sedan direkt i en flisbil, alternativt direkt i flisbilen, finns alltså en möjlighet att följa flisens ursprung med avseende på timmerklass och/eller en löpande egenskapsbeskrivning. Vid sortbyte uppkommer en sammanblandning av flistyper under en kortare tidsperiod, men under resten av sågpasset blir flisen tämligen homogen. Det innebär att det går att deklarerera den flis som respektive leverans av sågverksflis innehåller. Det behövs ingen extra logistik på sågverket, inte heller ytterligare lagringsplatser för flis. Det enda som behövs är att hålla ordning på vad som sågas när flisen hamnar i flisfickan och låta den kunskapen följa med partiet till massaindustrin.

På massaindustrin gäller det sedan att ta vara på den informationen och hantera den i det vidare flödet, så att kunskapen kan användas till effektivare processer eller förbättrad produktkvalitet. Kanske ska flis med olika egenskaper placeras i olika stackar, istället för bara i stacken för ”sågverksflis”. Eller så kan blandningen sågverksflis/rundvedsflis till processen varieras för att kompensera för aktuella variationer i sågverksflisens och rundvedsflisens egenskaper.



Figur 37. Exempel på flisficka på sågverk. Foto: Anders Lycken, RISE



Figur 38. Exempel på flisficka på sågverk. Foto: Anders Lycken, RISE

MASSAVED

Med digitaliserade vedflöden kan veden och dess egenskaper följas fram till fabriksgrind. Med ett detaljerat så kallat vedgårdssystem kan egenskaperna hos alla individuella travar på vedgården registreras i en databas och kontinuerligt uppdateras vartefter veden omsätts. Med en mindre utvecklad vedgårdshantering kan istället veden anrikas med specifika egenskaper på specifika platser på vedgården. I båda fallen skapas möjligheter att kontrollera egenskaperna i den ved man kör in till barktrumma, flishugg och stack. Om ved- och fiberegenskaper i den flis man matar in i kokare/raffinör inte är enligt specifikation kan blandningen av vedråvaran justeras, så att den håller sig inom kravgränserna. Detta måste dock göras med framförhållning eftersom mellanliggande processteg, bland annat uppehållstid i flisstackar/silos, måste beaktas.

Om veden inte sorteras eller hanteras selektivt på vedgården finns det ändå en vinst med att veta vad man har på vedgården så att man vet vad man matar in och kan skatta förväntade effekter på processen och produktens egenskaper.

Det finns svårigheter med att implementera bättre kontroll och styrning av vedgården. Många vedgårdar har mycket begränsad lagringsyta. Få vedgårdar har vedgårdssystem och sådana system behövs för att kunna kontrollera olika egenskaper. Det kostar att köra extra med trucken på vedgården när man utser specifika platser för viss typ av ved. Kan man inte räkna hem det så är det svårt att motivera att vedtrucken ska köra en extra sträcka för att placera/hämta veden på ett visst ställe. Men även om man lägger veden mer slumpmässigt så kan man sannolikt ofta ändå hitta den ved man söker inom rimligt avstånd.

Vedstyrning öppnar också nya möjligheter. Den kan till exempel skapa förutsättningar för att producera produkter med jämnare eller specifika egenskaper, till exempel ett bättre yttskikt genom att öka andelen ved med lättkollapsade fibrer. Eller ett bulkigare mittskikt med ved med större andel tjockväggiga fibrer. Ett annat tänkbart sätt är att hålla egenskaper inom specifikationer, för att kunna förebygga störningar så att de inte förorsakar problem i processer nedströms, utskott, banbrott och i värsta fall reklamationer.

Digitaliserade egenskaper skapar också nya möjligheter för avancerade dataanalytiska tillämpningar såsom AO och machine learning, inklusive deep learning. Om egenskaper för hela kedjan är kända från egenskaper på inmatad ved, massa och produkt, inklusive processdata för mellanliggande operationer, skapas unika möjligheter att förstå processen från ett helhetsperspektiv. Det kan leda till nya koncept för att skapa en optimal vedgårdshantering.

Så här långt är det möjligt att digitalisera vedflöden för egen skog levererad till bruket på lastbil. I dagsläget uppstår ofta, men inte alltid, svårigheter med ved som inte kommer från egen skog eller inte levereras med lastbil och det måste kunna hanteras. Men även för den skog som kommer på tåg och mellanlagrats på terminal bör det vara fullt möjligt att med vedgårdssystem på terminalen hantera information om vedens egenskaper.

Importerad ved är ytterligare en komplikation, då den ofta saknar data. Men också för att det kan röra sig om andra vedslag. På sikt bör dock även båtleveranser kunna hanteras på likande sätt som inhemska massavedsflöden då importveden normalt skördats med kortvirkesmaskiner och därmed kan generera produktionsfiler enligt StanForD. En temporär lösning för att hantera importved skulle kunna vara att grovt skatta dess egenskaper med

till exempel bildanalysbaserade verktyg som utvecklas och klassar veden i olika ålders- och diameterklasser. En uppdaterad uppsättning ved- och fiberegenskapsmodeller eller justerade modellparametrar behöver också tas fram för den importerade veden om ved och fiberegenskaperna avviker mycket.

Målet behöver kanske inte heller vara att all ved ska kunna deklarerars. Om 70–80 procent av vedflödet har kända egenskaper kan resterande ved sannolikt hanteras på ett för processer och produkter tillräckligt bra sätt.

TIMMER

Projektets resultat visar att produktutfallet varierar i olika avverkningsobjekt. Vid jämförelse mellan mätningar i sågverkets röntgenmätram och prognoser baserade på egenskapsmodeller finns en avvikelse i produktutfallet för enskilda objekt, där små klasser ger större genomsnittliga avvikelser än stora klasser. Med prognoser för produkter, exempel kärnveds-, friskkvist- eller någon annan specifik produkt, visar studien att objekt med mycket eller lite av en produkt går att identifiera. Att rangordna dem helt korrekt är dock svårt, däremot går det bra att klassa i grupper med mycket, lite eller genomsnittligt utfall av en produkt/ egenskap (Möller m.fl. 2020, opubl. b). Styrning för enskilda stockar är svårare. I många fall är det heller inte aktuellt utan det är ofta ett avverkningsobjekt eller vissa dimensioner från ett avverkningsobjekt som är aktuellt att styra på eller kanske köpa in. Genom att kombinera egenskapsdeklarationer per diameterklass från enskilda objekt kan dock sågverkets råvaruutnyttjande och produktutfall troligen utvecklas ytterligare.

Nyttan av att styra aptering och destinerings baserat på olika egenskaper, varierar beroende på olika industriernas strategier och storlekar. Är industrierna anpassade mot vissa marknader och/eller förädlingsindustrier ökar troligtvis/normalt behovet av styrning jämfört med om man säljer större andel standard- eller "bulkprodukter". På samma sätt bör styrningsbehovet öka då industrierna växer i storlek och därmed även upptagningsområdena. Större geografisk spridning ökar inverkan av olika klimat, bördighet, skötselhistoria och skadetryck. Det leder troligen till större variation i den inkommande råvarans egenskaper, jämfört med för mindre industrier med mindre upptagningsområden (Möller m.fl. 2020 opubl. b). Samtidigt kommer antagligen önskemålen om styrning att öka om det leder till högre intäkter än kostnader.

Följande fördelar kan man förvänta sig av ett system där stockegenskaper kan följas från skog till industri och tillbaka till skogen:

- Kunskapen kommer att ge bättre prognoser på egenskaperna i råvaran vilket bör leda till att förädlingsgraden kan ökas vid industrin.
- De bättre prognoserna gör att kvaliteten på råvaruflödet kan deklarerars/ kontrolleras bättre och därigenom kan också flödena bli jämnare eller styras olika över tiden.
- Ökade kunskaper om variationen i skogen kommer kunna leda till att apteringen kan styras effektivare i olika avverkningsobjekt beroende på industriernas behov.

Nedan följer några exempel på utvecklingsbehov för att tillgodogöra sig nyttan:

- System för automatisk analys, återkoppling av resultat från industrin och effektivare styrning bör utvecklas. Idag finns denna möjlighet främst vid sågverk som har tillgång till röntgendata från timmersortering, dock är den inte automatiserad utan finns endast på utvecklingsnivå.
- Utveckling av en standard för röntgenramsdata inkluderande mätta egenskaper och återföring av data som enkelt kan hanteras i databasmiljö oberoende av mättramstillverkare behövs.
- För att kunna tillgodogöra sig alla data måste företagen bygga databaser där data kan kopplas ihop, analyseras och sedan utnyttjas för att förbättra prognoser och produktstyrning. De flesta komponenter för att få till en sådan databas finns redan idag.
- Ett verktyg för att göra om prognostiserade egenskaper till sågverks- och massaprodukter för att kunna prognostisera produktutfall per avverkning automatiskt. Detta verktyg bör i ett första steg vara baserat på mätdata och funktioner/beslutsträd och i ett andra steg på AI.
- För att kunna ta steget över och jobba med AI och återkoppling krävs utveckling av filtreringsalgoritmer som tar hänsyn till hur apteringen skett på olika objekt. Då är det viktigt att veta att samma volymer som apterats har mätts in, och att indata är relevanta för objektet och håller tillräcklig kvalitet. Enhetliga objekt eller avgränsade beräkningsenheter där t.ex. trädålder och bördighet inte uppvisar stor variation ger större förutsättningar att nå säkrare prognoser.

Slutsatser

Från arbetet i det här redovisade projektet drar vi följande huvudsakliga slutsatser:

- Egenskapsdeklarationer är möjliga att åstadkomma och kan komma att bli ett centralt verktyg för resurseffektiv och lönsam integration av skog och industri framöver. Det finns dock behov av en branschgemensam standard för att kommunicera egenskapsdeklarationer så att alla aktörer kan tolka och dra nytta av innehållet samt utbyta information mellan varandra.
- Skattning av ved- och fiberegenskaper i timmer och massaved kan göras med befintliga modeller utifrån produktionsdata från skördare kompletterat med åldersuppgifter från skogliga register. Centralt för att bygga ett system för egenskapsdeklarationer är att bygga vidare på den digitala infrastrukturen för att strukturera och filtrera de data som behövs för beräkningarna.
- Skattning av ved- och fiberegenskaper i sågverksflis kan modelleras genom en modell för att dela upp stockens volym i en yttre och en inre del baserat på skördarinformation och åldersuppgifter. Skattningar av sågverksflisens torr-densitet som baseras på aggregerad information från konventionella röntgen mätramar, så som stockmedelvärden eller liknande, bedöms vara så pass osäkra att de för närvarande inte lämpar sig för flissortering.
- Råvarans egenskaper varierar i tillräckligt stor utsträckning för att det ska vara värdefullt att gå vidare med att undersöka hur information om denna variation kan utnyttjas för högre effektivitet och kvalitet i processer och slutprodukter.
- Det går att etablera användbara samband mellan data om råvarans fiberegenskaper och mätningar i framförallt tidiga processteg i massaprocessen. Att etablera sådana samband baserat på produktionsdata har inte gjorts tidigare.

Referenser

- Ekenstedt, F., Grahn, T., Hedenberg, Ö., Lundqvist, S-O., Arlinger, J. & Wilhelmsson, L. Variations in fiber dimensions of Norway spruce and Scots pine. Graphs and prediction models. STFI Report PUB 13. ISSN 1650-4607. Stockholm, 36 pp + Appendices.
- Grahn, T., Lundqvist, S-O. & Wallbäcks, L. 2010. Models predicting pulp and sheet properties from wood and fibre data of softwoods and hardwoods. Innventia report No.: 130.
- Ericson, B., Johnson, T. & Persson, A. 1973. Ved och sulfatmassa från tall och gran i orörda bestånd. Rapporter och uppsatser 25. Institutionen för skogsproduktion, Skogshögskolan, Stockholm, 143s.
- Esping, B. 1992. Trätorkning 1a Grunder i torkning. Stockholm: Trätek.
- Hartler, N. 1986. Wood quality requirements in mechanical pulping. Nordic Pulp and Paper Research Journal, Vol 1, 7 pp.
- Hägglund, B. & Lundmark, J-E. 1987. Handledning i bonitering med Skogshögskolans boniteringssystem. Jönköping: Skogsstyrelsen.
- Jonasson, J. (redaktör), Arlinger, J., Spångberg, K., Wilhelmsson, L., Ekenstedt, F., Grahn, T., Hedenberg, Ö., Lundqvist, S. O., Jansson, U., Jonasson, J. & Oskarsson, R. 2000. Skog-Massa-Papper Sydsvensk utvidgning. Rapport en del av dokumentationen från projekt Skog-Massa-Papper (STFI & Skogforsk,). Södra, Mörrum 89s.
- Kocurek, M.J., Stevens, C.F.B. (editors.) 1983. Pulp and paper Manufacture, Vol 1, Properties of fibrous raw materials and their preparation for pulping. Canadian Pulp and Paper Association, Montreal, 180 pp.
- Lundqvist, S-O. & Brattberg T. 1983. Hur skall renseriet se ut? Simulering hjälper dig välja rätt. Svensk papperstidning nr 2.
- Lundqvist S-O. & Grahn T. 2008. Forest Resource Databases - a concept for product-oriented mapping of properties and volume in forest resources. STFI-Packforsk report No: 446.
- Lycken, A. & Luomala, P. 2019. Det digitala sågverket – Slutrapport. RISE Rapport 2019:17, Stockholm.
- Microtec 2020. <https://microtec.eu/assets/products/sawmill-4-0-digital-fingerprint/MT-Digital-Fingerprint-Gapless-traceability.pdf> (2020-09-09)
- Moberg, L. 2006. Predicting knot properties of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* from generic tree descriptors. Scandinavian Journal of Forest Research 21:Supplement 7. pp 49-62.
- Möller, J.J., Bhuiyan, N., Arlinger, J. & Eriksson, I. hprYield – beräkningsmodul för generering av geografiskt uppdelade nyckeltal baserat på skördardata. Skogforsk. Opublicerat a.

- Möller, J.J., Nordström, M., Wilhelmsson, L., Söderberg, J. & Arlinger, J. Pilottest styrning med virkesegenskaper. Skogforsk. Opublicerat b.
- Ohlström, A. 2020. Teknisk beskrivning av Propps, version 0.2.4. Skogforsk.
- Siljebo, W., Möller, J.J, Hannrup, B. & Bhuiyan, N. 2017. hprCM – modul för beräkning av trädegenskaper och skogsbränslekvantiteter baserat på skördardata. Arbetsrapport 944. Skogforsk.
- Skog, J., Vikberg, T. & Oja, J. 2010. Sapwood moisture-content measurements in *Pinus sylvestris* sawlogs combining X-ray and three-dimensional scanning. Wood Material Science & Engineering, 5:2, 91-96.
- Skog, J., Rasimus, A. & Lycken, A. 2015. Fingerprint traceability opens the door to smart sawmill production, Conference proceeding, Class Conference, Bled Slovenia.
- Skog, J., Jacobsson, M. & Lycken, A. 2017. Traceability and adaptive production in the digital sawmill. Pro Ligno, 13(4), 162-167.
- Uusijärvi, R. 2000. Automatic tracking of wood, KTH Institutionen för produktions-system., Stockholm.
- Wilhelmsson, L., Arlinger, J., Spångberg, K., Lundqvist, S-O., Grahn, T., Hedenberg, Ö. & Olsson, L. 2002. Models for Predicting Wood Properties in Stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research, 17:4, 330-350.
- Wilhelmsson, L. & Moberg, L. 2004. Viktsutredning – Råvolymvikter – Prognos för medelvärden och spridningsmått med hjälp av beräkningsmodeller och vägning vid mätstationer. Arbetsrapport 569. Skogforsk, Uppsala. 36s.
- Wilhelmsson, L. 2005. Characterisation of stem, wood and fiber properties – industrial relevance Arbetsrapport 590. Skogforsk, Uppsala, 29 pp.
- Wilhelmsson, L. 2006. Two models for predicting the number of annual rings in cross-sections of tree stems. Scandinavian Journal of Forest Research 21:Supplement 7, pp 37-47.