



LANDSKAP TRÄDGÅRD JORDBRUK

Rapportserie

Fiber- och energigrödor som råvara till produktion av dissolvingcellulosa och biprodukter

Fibre and energy crops as raw material for production of dissolving cellulose and by-products

Thomas Prade

Område Agrosystem, SLU Alnarp

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för landskapsplanering, trädgårds- och jordbruksvetenskap

Rapport 2012:28

ISSN 1654-5427

ISBN 978-91-87117-27-5

Alnarp 2012



1 Sammanfattning

Denna förstudie hade till mål att identifiera ett antal grödor som kan vara intressant som råvara för produktion av specialcellulosa och bioenergi i norra Sverige. Baserat på en litteraturstudie skulle dessutom kartläggas, vilka aspekter av användandet av grödorna för nämnd ändamål som har undersökts tidigare.

Baserat på potentiella avkastningsnivåer för både fiber och biomassa har fem grödor utvalts för en mer detaljerade litteraturgenomgång. Dessa grödor är rörflen, rörsvingel, ängssvingel, timotej och hampa. För varje gröda har undersökts vilka skördetidpunkter som kan bli relevanta och hur de påverkar biomassans kvalitet. En rad förbehandlingsmetoder har listats som potentiell kan bidra till en mer ekonomisk transport, förbättrad fiberutbyte och minskade problem i massaprocessen.

Odling av gräsarterna rörsvingel, ängssvingel och timotej i renbestånd eller i en vallblandning med kvävefixerande baljväxter kan minska insatskostnader och därmed förbättra ekonomin. Även samodling kan tänkas ge nya möjligheter till stabila skördar, men detta bör provas i fältförsök.

De fem grödorna visar avkastningsnivåer för fiber-, massa, respektive biomassa som liknar eller överstiger björk, som är den råvara som lantbruksgrödorna potentiellt kan ersätta. Det finns ingen självklar logistikkedja för skörd, transport och lagring av de fem grödorna. Denna studie har kartlagt vilka olika skörde-, transport- och lagringsmöjligheter är rimliga, men systemen behöver provas i verkligheten.

Den potentiella massa- respektive fiberkvaliteten har undersökts i mycket begränsat omfattning med hjälp av ett fåtal indikatorer såsom askhalt respektive kiselhalt och fiberlängden. Resultatet visar behov för en kemikalieåtervinningsprocess som är anpassat till högre mineralhalter än i björkmassa, alternativt en eller flera förbehandlingsmetoder som kan förbättra råvarans kemiska sammansättning. Ett antal olika förbehandlingsmetoder presenteras i rapporten.

Dessutom är det tydligt att andelen finfraktion från de fem grödorna kommer att bli mycket högre än vad som är typisk t.ex. för björk. Detta tyder på behov av anpassning av processen respektive behov för en eller flera förbehandlingsmetoder av fiberråvarorna. Eftersom vissa förbehandlingsmetoder tenderar till att minska problem med både höga mineralhalter och höga finfraktionsandelar bör det undersökas hur stor effekten av förbehandlingen kan vara.

Bioenergiproduktion från fiberproduktionens biprodukter har undersökts och olika möjligheter till bi-produkter presenteras. Det är mestadels biomassa från potentiella fraktioneringsmoment samt etanolutvinning från tvättvattnet efter fiberkokningen som bidrar till energivinster. Eftersom erfarenheter från lantbruksgrödor i sulfitmassaprocessen är mycket begränsat, är det oklart om hur stor etanolutbytet kan vara. Det bör därför undersökas vilka sockerarter som de olika biomassafraktionerna består av.

2 Summary

This pilot study had the aim of identifying a number of crops that can be interesting as raw material for production of special cellulose and bioenergy in northern Sweden. Based on a literature study it aimed at presenting which aspects of these crops relevant for this purpose were investigated earlier.

Based on potential yield levels for both fibre and biomass, five crops have been chosen for a more detailed literature study. These crops are reed canary grass, tall fescue, meadow fescue, timothy and hemp. For each crop it was investigated which harvest dates can be relevant and how these affect biomass quality. A number of pre-treatment processes have been listed that potentially can improve economics of transport and fibre yield and can reduce problems related to the pulping process.

Co-cultivation of the grasses tall fescue, meadow fescue and timothy as sole crops or in a ley crop mix with nitrogen-fixing legume crops can decrease fertilization costs and therefore improve economics. Co-cultivation can potentially lead to more stable biomass yields, men should be proved in field trials.

The five crops studied in more detail display yields of fibre, pulp and biomass, respectively, which are equal or higher compared to birch, which is the source of fibres these agricultural crops can potentially replace. There is no obvious logistic chain for harvest, transport and storage of these five crops. However, this study shows options for these logistics that are relevant, but need testing in reality.

The potential pulp respectively fibre quality has been investigated to a very limited extent with help of some indicators such as ash respectively silicon content and fibre length. The results show a need for a recycling process for pulping chemicals that is adjusted to higher mineral contents than in birch. Alternatively, one or several pre-treatment steps could improve the raw material's chemical composition. A number of pre-treatment processes are presented in this report.

Furthermore, the fraction of fines in pulps made of these five crops will be higher than usual, i.e. for birch. This indicates a need to adjust the process respectively a need to pre-treat the fibre raw materials. Since some pre-treatment methods tend to decrease problems in connection with high fines fractions and high mineral content both, the proportion of the effect needs to be investigated further.

Production of bioenergy from by-products of the fibre production process has been investigated and a number of different potential sources of by-products are presented. The most promising by-products for e.g. ethanol production originate from fractionation processes and from the pulping process. Since experiences of agricultural crops in a sulphite pulping process are limited, it is unclear how large ethanol yields may be. It is therefore advised to investigate the composition of monomeric sugars in the different biomass fractions.

3 Innehållsförteckning

1	<i>Sammanfattning</i>	1
2	<i>Summary</i>	2
4	<i>Bakgrund</i>	6
5	<i>Problemställning</i>	6
6	<i>Hur är rapporten upplagd?</i>	6
7	<i>Begränsningar</i>	7
7.1	Bioenergiproduktion	7
7.2	Ekonomiska aspekter	7
7.3	Råvaruförsörjning	7
7.4	Utbyte och kvalitet av massa- och fibrer	7
8	<i>Fiberursprung</i>	8
8.1	Fördelar av icke-trägrödor	8
8.2	Nackdelar av icke-trägrödor	8
9	<i>Viktiga delar av dissolvingmassans produktionsprocess</i>	9
9.1	Råmaterial	9
9.2	Kokningsprocess	9
9.3	Blekningsprocess	9
9.4	Dissolvingmassa	9
9.5	Kemikalieåtervinning	10
9.6	Produkter	10
9.7	Produkternas användningsområden	10
10	<i>Processspecifika krav på substratet</i>	11
10.1	Fiberproduktion	11
10.1.1	Substanser som stör processen	11
10.1.2	Ljushet	11
10.1.3	Kappatal	11
10.1.4	Avvattningshastighet för fibertorkning	11
10.2	Etanolproduktion	12
10.2.1	Fukthalt	12
10.2.2	Partikelstorlek	12
10.2.3	Substanser som stör processen	12
10.2.4	Ligninhalt	12
11	<i>Egenskaper och -avkastning av fiber och massa</i>	14
11.1	Biomassa- och massaavkastning	14

11.2	Sammansättning av biomassan	15
11.3	Fibergeometri	15
11.4	Askhalt	16
11.5	Kokning och blekning	17
11.6	Potentialbedömning och urval av lämpliga grödor	17
12	Potentiella fibergrödor	20
12.1	Rörflen (<i>Phalaris arundinacea</i>)	20
12.1.1	Odlingsaspekter	20
12.1.2	Odlingsareal	21
12.1.3	Skördesystem	21
12.1.4	Biomassa- och fiberavkastning	22
12.1.5	Kemisk sammansättning	23
12.1.6	Massa- och fiberegenskaper	24
12.1.7	Möjligheter för energiproduktion	26
12.2	Rörsvingel (<i>Festuca arundinacea</i>)	27
12.2.1	Odlingsaspekter	27
12.2.2	Odlingsareal	27
12.2.3	Skördesystem	27
12.2.4	Biomassa- och fiberavkastning	27
12.2.5	Kemisk sammansättning	28
12.2.6	Massa- och fiberegenskaper	29
12.2.7	Möjligheter för energiproduktion	29
12.3	Ängssvingel (<i>Festuca pratensis</i>)	30
12.3.1	Odlingsaspekter	30
12.3.2	Odlingsareal	30
12.3.3	Skördesystem	30
12.3.4	Biomassa- och fiberavkastning	30
12.3.5	Kemisk sammansättning	30
12.3.6	Massa- och fiberegenskaper	31
12.3.7	Möjligheter för energiproduktion	31
12.4	Timotej (<i>Phleum pratense</i>)	32
12.4.1	Odlingsaspekter	32
12.4.2	Odlingsareal	32
12.4.3	Skördesystem	32
12.4.4	Biomassa- och fiberavkastning	32
12.4.5	Kemisk sammansättning	32
12.4.6	Massa- och fiberegenskaper	33
12.4.7	Möjligheter för energiproduktion	33
12.5	Hampa (<i>Cannabis sativa</i> L.)	34
12.5.1	Odlingsaspekter	34
12.5.2	Odlingsareal	34
12.5.3	Skördesystem	35
12.5.4	Biomassa- och fiberavkastning	36
12.5.5	Kemisk sammansättning	36
12.5.6	Massa- och fiberegenskaper	37
12.5.7	Möjligheter för frö- och energiproduktion	38

13	<i>Möjligheter till förbehandling</i>	39
13.1	Kompaktering inför transport	39
13.1.1	Balning	39
13.1.2	Brikettering	39
13.1.3	Pelletering	40
13.2	Tvättning	40
13.3	Fraktionering	40
13.3.1	Luftfraktionering	40
13.3.2	Mekanisk (torr-)fraktionering	41
13.4	Kiselavskiljning	42
13.5	Svampbehandling	42
13.6	Rötning	42
14	<i>Resultat och slutsatser</i>	44
14.1	Odlings- och skördesystem	44
14.2	Biomassaavkastning	45
14.3	Fiberutbytet	45
14.4	Energiutvinning	45
15	<i>Rekommenderat läsning</i>	47
16	<i>Tack</i>	47
17	<i>Referenser</i>	48

4 Bakgrund

Målsättningen med denna förstudie är att undersöka vilka råvaror från åkermark som kan odlas främst lokalt i norra Sverige samt sammanställa vad som tidigare har undersökts på dessa råvaror inom framställning av dissolvingcellulosa kombinerat med andra produkter som t.ex. etanol och biogas. Vidare syftet med denna studie var att genom litteraturstudier och intervjuer kartlägga vilka råvaror som potentiell finns tillgängligt, dvs. vilka råvaror till ändamålet det finns erfarenheter om inom lantbrukssektorn. Med benämningen råvara menas i detta sammanhang jordbruksgrödor och biprodukter från lantbruket.

5 Problemställning

Massaproduktion är till stor andel baserat på skogsråvaror som levererar långa fibrer. Råvarutillgång för produktion av massor med korta fibrer t.ex. från lövträd är dock begränsat och en stor del av råvaran importerats. Jordbruksgrödor kan tänkas ersätta import av sådana kortfiberråvaror. Om jordbruksgrödor ska vara ett intressant alternativ, måste de tillförlitlig vara tillgänglig i en viss volym samt håller vissa kvalitetskriterier. Det är dock oklart om vilka kvalitetskriterier det är samt om det finns tekniska processer som påverkar kvaliteten på biomassan om vissa kriterier inte uppfylls.

Eftersom det finns ett antal jordbruksgrödor, men även många olika förbehandlingssteg, fraktioneringsalternativ och massa- och energiprocesser som potentiellt kan kombineras, är det inte en tydlig grupp av specifikationer som måste uppfyllas. Detta medför att det krävs en väldig omfattande litteraturanlys även för att bara kunna belysa möjligheterna med nya grödor och biprodukter. Lokaliseringen av studien i odlingsförhållanden som råder i norra Sverige begränsar dock åtminstone antal grödor som kan vara intressant för ändamålet.

Studien redovisar intressanta grödor ur odlings-, logistiks- och avkastningssynvinkel. Slutlig är det en ekonomisk analys som avgör vilka råvaror man kommer att gå vidare med. Ekonomiska analysen ingår inte i denna studie, men en hög avkastning av biomassa och fiber är ett mycket klart tecken på potentiella nya råvaror.

Studien visar på vad som är gjort med dessa grödor när det gäller kemiska och processtekniska delar t.ex. utbyten och körbarhet mm. Denna studie belyser även optimala skördetidpunkter. Med det begränsade projektomfånget blev det inte en djupare analys av hanteringssystem men inför en eventuell fortsättning har stora kritiska frågeställningar identifierats. Ett fungerande hanteringssystem var inget tvång för grödorna och biprodukter så länge det var rimligt att kunna skapa dessa. Studien har generat förslag till fortsatta utvecklingsaktiviteter med några intressanta råvaror.

6 Hur är rapporten upplagd?

Efter en inledning till massaprocessen (kapitel 8) ges en översikt över vilka krav som ställs på (fiber-)produkten (kapitel 9). I kapitel 10 redovisas vilken avkastning och vilka egenskaper fibrerna och massan har i direkt jämförelse mellan grödorna som resulterar i ett urval av fem lämpliga grödor som karakteriseras i kapitel 11. Dessa grödor är rörfen, rörsvingel, ängssvingel, timotej och hampa. Alla dessa grödor är kännetecknade genom en existerande logistikkedja för odling, skörd, förbehandling samt transport. För varje av dessa grödor beskrivs odlingsbetingelser, avkastning av biomassa såväl fibrer och logistikdetaljer. Det görs förslag på nödvändiga förbehandlingar för att uppfylla de processspecifika krav eller för att förbättra fiberegenskaperna, samt vilka möjligheter för energianvändning som finns för bi-

produkter från fiberprocessen. Förbehandlingsmetoder för potentiell förbättring av kvalitén och ekonomin i grödorna redovisas exemplarisk för rörligen i kapitel 12. Resultaten sammanfattas i kapitel 13. I samma kapitel diskuteras vilka frågeställningar som måste undersökas för en vidareutveckling av grödorna.

7 Begränsningar

Denna studie fokuserar på att sammanställa information kring nya grödor samt deras egenskaper och förutsättningar för produktion av dissolvingmassa och bioenergi från bi-produkterna. Studien avgränsas dock mot ett antal aspekter för att uppfyller målen inom projekttiden:

7.1 Bioenergiproduktion

Studien undersöker vilka plantdelar som kan användas för produktion av dissolvingmassa och vilka bi-produkter som uppstår från fält till färdig massa. Dessa bi-produkter karakteriseras och förslag till energianvändning görs. Det görs ingen särskilt undersökning om och hur hela grödorna kan användas som energikälla.

7.2 Ekonomiska aspekter

Inga ekonomiska aspekter vägs in, men en viss ekonomisk bedömning kan ske genom biomassa- och fiberavkastning av de grödor som undersöks.

7.3 Råvaruförsörjning

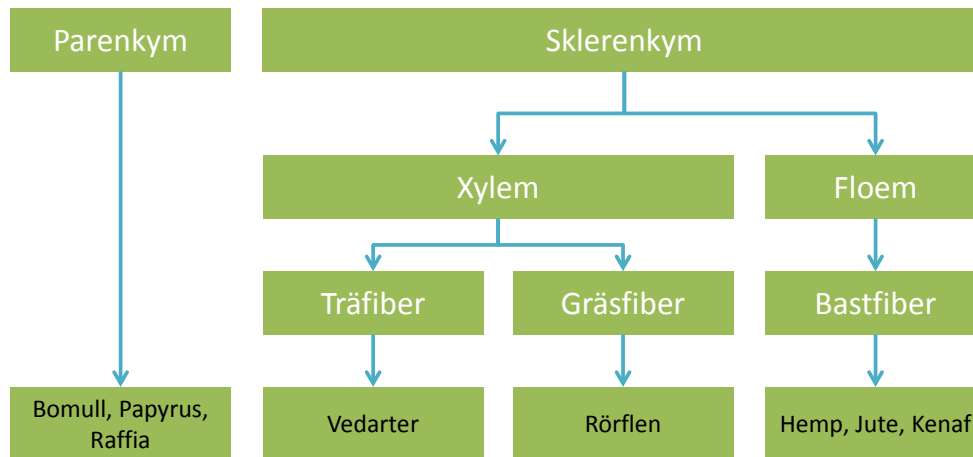
Det är sannolikt att ett massabruk ska bedrivas året runt istället för i kampanjer som tar hänsyn till grödornas skördetid. Detta problem kan inte lösas genom en kombination av olika grödor för en förlängd tillgänglighet, speciellt i Norra Sverige är odlingssäsongen relativt kort. Dessutom skulle en varierande blandning av råvaror (t.ex. lövved under de månader när inga lantbruksgrödor finns tillgängliga) betyder ett behov på löpande anpassning av massaprocessen till de olika substrategenskaperna. Dessa möjligheter undersöks inte i denna studie, istället undersöks vilka möjligheter till lagring av råvarorna som finns.

7.4 Utbyte och kvalitet av massa- och fibrer

Massa och fiberutbyten har angetts som rapporterats i litteraturen. Det har inte tagits hänsyn till kokningens processparameter och kemikalierna som används. Eftersom det är oklart hur mycket processen skulle påverka utbyten för lantbruksgrödor är siffrorna för utbyten alltså mycket osäker. De nämns ändå för att indikera grödornas potential. Ett antal viktiga parametrar som t.ex. askhalt, speciell kiselhalt och fiberlängden har använts som indikatorer på lantbruksgrödornas potentiella fiberkvalitet.

8 Fiberursprung

Kommersiellt intressanta fibrer kan förenklat räknas tillhör två av tre botaniska celltyper, som heter parenkym och sklerenkym. Grödor som levererar parenkymfibrer är bara bomull, papyrus och raffia (en palmsort). De övriga grödor som används för fiberproduktion levererar fiber från sklerenkymvävnad. Här kan man skilja mellan träfiber, som har sitt ursprung i växtvävnaden som kallas sekundärxylem och icke-träfiber, som har sitt ursprung i växtvävnaden som kallas för sekundärfloem (Figur 1). Se McDougall, Morrison, Stewart, Weyers and Hillman [10] för en utförlig beskrivning.



Figur 1. Ursprung av fibrer från olika växtdelar [ändrat från 11, 12].

Gemensamt för alla dessa växter är att man för massaproduktion syftar att extrahera tjockväggiga celler med en längd av mellan 0,5 och 5 mm [13]. Tunnväggiga celler förstörs ofta under en kemisk massaprocess och bildar den så kallade finfraktionen som ställer till problem vid avvattning av massan.

8.1 Fördelar av icke-trägrödor

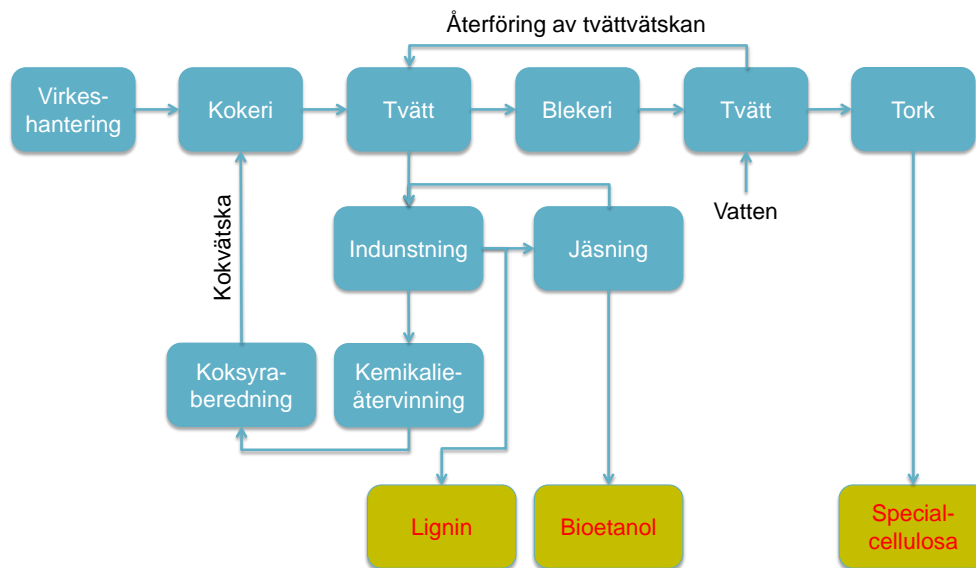
Icke-träfiber har sitt ursprung i ettåriga växter som kultiveras och skördas årligen, oftast med hög biomassaavkastning. De flesta ettåriga grödor har en relativt låg halt av lignin i jämförelse till trä. Eftersom kokningsprocesser för produktion av massa bygger på att ta bort ligninet för att frigöra fibrerna är en låg ligninhalt önskvärd. I teorin besparar en låg ligninhalt kemikalier som behövs för att ta bort ligninet [11].

8.2 Nackdelar av icke-trägrödor

Försörjningen av en stor massafabrik med icke-träråvaror kräver en omfattande logistik. Stora volymer samt icke-förstörande lagring av grödorna krävs. Ettåriga grödor som odlas på jordbruksmark har ofta höga halter av mineraler (dvs. en hög askhalt). En stor andel av kisel, som representerar en hög andel av askan, löser ut i luten under kokningsprocessen och därmed kan orsaka problem i samband med återvinning av kokningskemikalierna. Fiberhalterna i ettåriga grödor kan vara mindre än i trägrödor, detta medför oftast att ett separeringssteg behövs innan fibrerna skickas in i massaprocessen [11].

9 Viktiga delar av dissolvingmassans produktionsprocess

I produktionsprocessen av dissolvingmassa ingår ett antal processteg (Figur 2). De viktigaste processtegen beskrivs kortfattat i följande kapitel. Hela processen från stock till färdig bal tar ca 40 timmar.



Figur 2. Schematisk bild av Domsjös produktionsprocess [14].

9.1 Råmaterial

Råvaran som används hos Domsjö Fabriker AB är övervägande gran men även tall och sågverksflis används [15]. Totalt förbrukas cirka 1 miljon ton skogsråvaror årligen [15]. Virket är dels ur inhemsk produktion dels importerat, det fraktas med båt, bil eller järnväg. Det barkade virket flisas och matas tillsammans med kokkemikalier in i kokare. Barken bränns och ger energi i form av ånga.

9.2 Kokningsprocess

Kokningsprocessen som används hos Domsjö är en sulfitprocess baserad på natriumbisulfit som också kallas natriumvätesulfit (NaHSO_3). Den alkaliska HSO_3^- reagerar med kemiska strukturer i ligninet och producerar vattenlösliga sulfonater. Vatten som bidrar till lösning av sulfonaterna inducerar en svällning av fibrerna, detta hjälper till att det löser ännu mer lignin. I den sura lösningen kondenserar hartsliknande polymerer, och hemicellulosa hydrolyseras [10]. Under kokningen löses alltså hemicellulosa och lignin, medan fibrerna, som består av huvudsakligen cellulosa, stannar intakt. Inför vidare behandling tvättas fibrerna efter kokningen.

9.3 Blekningsprocess

I blekeriet blecks fibrerna i en sluten process. Blekningen sker i ett alkalisteg och i ett efterföljande peroxidsteg. Färskvatten används för tvättning efter sista bleksteget och förs sedan motströms massaflödet. Den blekta cellulosan torkas och levereras i balar.

9.4 Dissolvingmassa

Det första steget i produktionen av dissolvingmassa är att tvätta massan i en stark alkalisk lösning. Detta medför ytterligare bortförelse av störande lignin och hemicellulosa. Sedan hackas cellulosan och behandlas med koldisulfid (CS_2) för att forma celluloxantat som är

vattenlösligt. Denna alkaliska dissolvingmassa av cellulosa xantat filtreras och kan sedan användas för produktion av viskosfiber [10].

Dissolvingmassa är en kemisk processad och blekt massa med lågt utbyte (30-35 %). Cellulosafiber utgör mer än 90 % av massan, och halterna av hemicellulosa och lignin är mycket låga (1-10 % och <0,6 %, respektive) [16]. Massan har speciella egenskaper såsom hög ljushet och uniform molekylviktfordelning. Den används för produktion av viskos, cellulosaestrar, cellofan och en rad kemiska additiv [17].

Cellulosahalten i dissolvingmassan beror till stora delar på beredningsprocessen och avgör användningsområdet. I en sulfitprocess kan cellulosahalten uppgå till 92 % (med reningssteg upp till 96 %), medan i en sulfatprocess cellulosahalten uppgår till 96 % (med reningssteg upp till 98 %) har uppnåtts [17]. Effektiviteten för omvandling till produkter påverkas negativt av höga halter av hemicellulosa och lignin [16]. T.ex. är ljusheten negativt korrelerat till resthalt av lignin i massan [16]. Halten av hemicellulosa däremot påverkar andra parameterar såsom hållfasthet och utbyte av t.ex. viskos [16].

För produktion av cellulosa produkter extruderas viskosen i ett syrabad som hydrolyserar xantatgrupperna och cellulosastrukturen återställs.

9.5 Kemikalieåtervinning

I ångcentralen återvinns kokkemikalierna medan samtidig energi utvinns i form av ånga som används i produktionsprocesserna. Luten bränns i sodapannor, vars rökgaser skrubbas för återvinning av svaveldioxid. Den i sulfitavluten upplösta hemicellulosan jäses till etanol och koldioxid, medan det utfällda ligninet torkas och bränns för energiproduktion.

9.6 Produkter

Förutom huvudprodukterna specialcellulosa, bioetanol och lignin producerar bioraffinaderiet allt fler kompletterande produkter såsom bioenergi, bioharts, jordförbättringsmedel, kolsyra och biogas.

9.7 Produkternas användningsområden

Specialcellulosan används i vitt skilda konsumentnära produkter. Det största användningsområdet är i viskostyger och hygienprodukter där den utgör ett alternativ till bomull. Specialcellulosan återfinns också i läkemedelstabletter, konsistensgivare i livsmedel mm.

Cellulosa återfinns i ett antal konsumentprodukter såsom tråd (filament), textilier, blöjor, bindor, non-woven, tabletter (som bärare av aktiv substans), tvättmedel och målarfärg (som konsistensgivare).

10 Processspecifika krav på substratet

10.1 Fiberproduktion

Utbytet är oberoende av bladandel i råvaran, medan avvattningsmotstånd och kiselhalten ökar med ökande bladandel [18].

10.1.1 Substanser som stör processen

Höga halter av bl.a. kisel och kalium försvårar kemikalieåtervinningen i fabriken [19]. Kisel har också nämnts som substans som bidrar till ökad förbrukning/slitning av maskinutrustningen [20], försämrar kvalitén på papper [21] och försvårar återvinningen av kemikalier och energi [22, 23].

I en alkalisk massaprocess löses kisel i kokvätskan. När vattnet evaporeras från luten höjs halten av kisel i så hög grad att den kan skapa problem i återvinningsprocessen [12]. Det existera dock ett antal avskiljningsprocesser för kisel. Den kemiska processen för avskiljning av kisel är enkel, men svårigheten består i den fysiska separeringen av den kisel-rika procesströmen [24]. En process som har används på produktionsskala är fällning av kisel ur luten genom delvis försurning med hjälp av koldioxid [24].

10.1.2 Ljushet

Ljusheten¹ av en massa mäts i procenttal av absolut vit. Oblekta massor har en ljushet på ca 25 %, medan bleka massor ligger runt 70-90 % ljushet [25].

10.1.3 Kappatal

Kappatalet är ett mått för restmängden lignin i en massa. Kappatalet bestäms enligt internationell standard ISO 302:2004. ISO 302 kan användas för alla sorts kemiska massor och resulterar i ett kappatal mellan 1-100. Kappatalet mäter massans förbrukning av kaliumpermanganat för oxidering av ligninet i massan. Mängden kaliumpermanganat som förbrukas är ungefär proportionell till ligninhalten av massan:

$$K \approx k \cdot l$$

K: Kappatal; k: konstant $\approx 6,57$ (beroende på process och råmaterial); l: ligninhalt (%)

Kappatalet kan därmed användas för att bedöma effektiviteten av kokningsprocessen och att uppskatta mängden kemikalier som behövs för att bleka massan till en viss grad. Kappatalet ligger runt 25-30 för blekbara massor, runt 45-55 för pappersmassor för produktion av papperssäckar och runt 60-90 för wellpapp.

10.1.4 Avvattningshastighet för fibertorkning

Avvattningsbeteendet av en massa kan mätas på många olika sätt. En av de vanligaste metoder som används i praktiken är Schopper-Riegler testet som mäter avvattningshastigheten i enheten °SR enligt

$$\text{Avvattningshastighet } [^{\circ}\text{SR}] = 100 - \left(\frac{\text{Dränerat vatten [ml]}}{10} \right)$$

¹ Engelskt begrepp: brightness

Skalan räcker från 0°SR (1000 ml avvattnat) och 100°SR (0 ml avvattnat), dvs. en låg °SR-tal står för en massa med goda avvattningssegenskaper. För björkved ligger den typiska avvattningshastigheten på runt 15°SR [26].

Avvattning av massorna är beroende bl.a. på pektinhalten: En hög pektinhalt leder till svåravvattnade massor [27]. Den färdiga massan kan också ha en hög finmaterialhalt och är därmed svåravvattnad (högt SR-tal), vilket kräver utökad kapacitet för avvattning och tvättning [8, 19, 28]. Detta leder ofta till högre investeringskostnader [29]. Låg avvattningskapacitet och behov av stora filtertytor kan därmed fördyra massaprocessen [8].

10.2 Etanolproduktion

10.2.1 Fukthalt

Det finns få specifika krav på energigrödor som ska användas som etanolsubstrat. Den viktigaste är kanske fukthalten som spelar mest en ekonomisk roll. Det rekommenderas en fukthalt i biomassan på max 30-40 % [30]. Vid förbehandlingen av råvaran ökar fukthalten då ånga kondenseras. Även om etanolprocessen fungerar bättre med högre vattenhalt, går det åt för mycket energi för att ta bort vattnet vid etanoldestillationen, som gör att processen blir oekonomisk.

10.2.2 Partikelstorlek

Vanligast behövs att biomassan är sönderdelad, t.ex. träråvaror ska vara flisade. Samma typ av flis som för massaproduktion kan användas. Halm och halmlignade råvaror ska helst vara klippta i t.ex. 5 cm långa bitar men det är helt och hållet beroende på typ av utrustning som används vid förbehandlingen [30].

10.2.3 Substanser som stör processen

Eftersom biomassa är en mycket komplex samling av substanser, kan det förekommer vissa som kan störa de biologiska stegen i etanolprocessen, dvs. enzymatisk hydrolys och framförallt jäsnings. Det kan t.ex. finnas toxiska effekter mot processen mikroorganismer som orsakas av extraktivämen som ska skydda växter mot angrepp.

Vid nedbrytning av hemicellulosa kan acetylgrupper omvandlas till ättiksyra, speciellt under sura förhållanden i förbehandlingen. Ättiksyra kan, i för hög koncentration, orsaka celledöd i jästcellerna som katalyserar etanolproduktionen och därmed minska produktionshastigheten av etanol [31].

Under själva förbehandlingen kan det bildas ämnen såsom sockernedbrytningsprodukter (furanerna, furfural och HMF) och dess nedbrytningsprodukter (levulinsyra och myrsyra). Från ligninets nedbrytning kan det bildas fenoliska ämnen. Dessa ämnen har liksom ättiksyra en inhiberande effekt på etanoljäsnings [30, 32].

Men även mineraler i biomassan kan bidra till störningar i jäsningsprocessen. Det är mest alkali- och tungmetaller som har inhibitoriska effekter. Dessa mineraler förekommer antingen i biomassan, tillsätts i förbehandlingssteget eller löses ur reaktorväggarna under förbehandlingen [33]. Återanvändning av processvattnet kan bidra till ökade koncentrationer av dess ämnen. Det är ofta höga halter av klor, kalcium och magnesium och deras relativa mängder (t.ex. Ca/Mg förhållande) som orsakar inhibering av etanolproduktionen [33].

10.2.4 Ligninhalt

För etanoljäsnings måste komplexa molekyler såsom hemicellulosa och cellulosa hydrolyseras till monomerer. Detta kan antingen göras i massaprocessen eller i ett eget

förbehandlingssteg direkt inför etanoljäsningen. Den enzymatiska hydrolysen kan störas av t.ex. höga halter av lignin. En del enzymer kan då binda till ligninet och medverkar därmed inte i hydrolysen av cellulosa. Som resultat behövs större mängder enzymer. Processen kan genomföras även för biomassa med höga ligninhalter, men kostnaderna för enzymerna i hydrolysen stiger avsevärd [30].

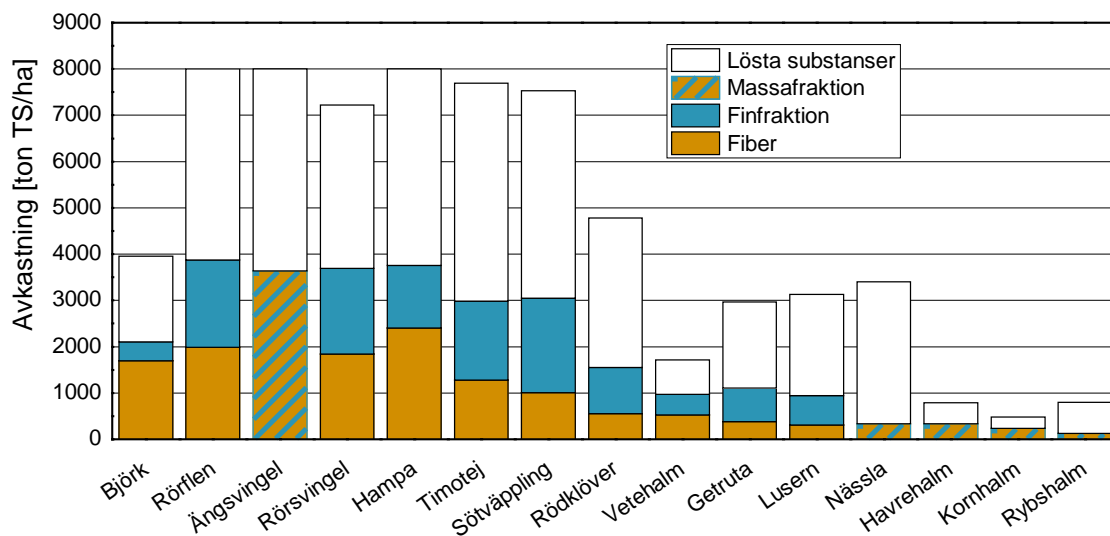
En förbehandling som löser upp ligninet, t.ex. en alkalisk förbehandling, minskar dessa problem, då mängden fast lignin som följer med cellulosan in till hydrolysteget minskar [30].



11 Egenskaper och -avkastning av fiber och massa

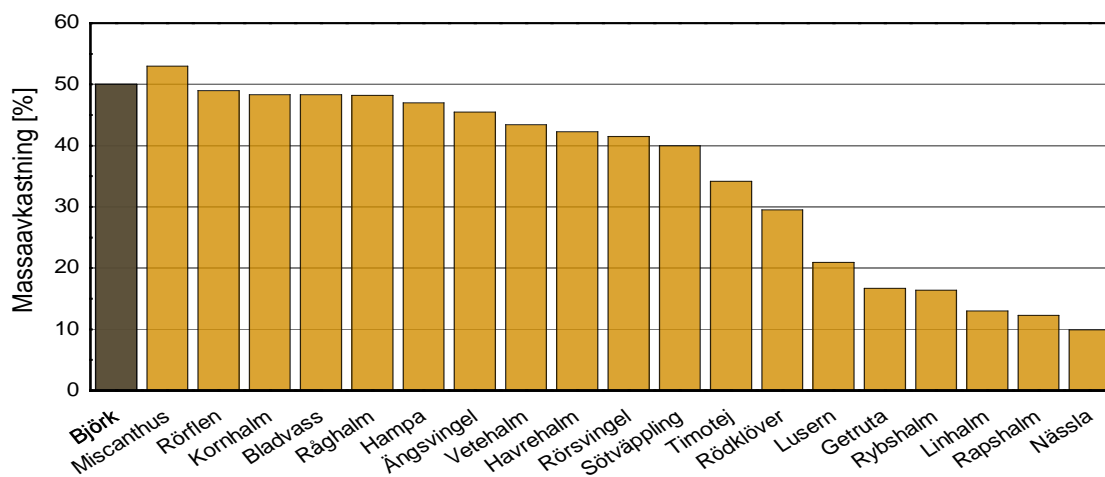
11.1 Biomassa- och massaavkastning

För att vara en intressant fiberkälla, skulle grödor ha en likvärdig fiberavkastning, i fall de inte ha speciella fiberegenskaper som kan betala för eventuella merkostnader i produktionen och transport av biomassan. Det finns bara ett fåtal grödor som kan matcha detta krav, nämligen rörflen, ängssvingel, rörsvingel, hampa, timotej och sötväppling (Figur 3). Generellt har baljväxter (med sötväppling som undantag) en mycket låg fiberavkastning. Detta är i överensstämmelse med tidigare studier [8, 9, 13]. Bärningsbara mängder av stråsädeshalm och därmed fiberavkastningar är mycket låga i norra Sverige. Miscanthus som har tidigare undersökts som fibergröda kan inte odlas i norra Sverige, pga. klimatet.



Figur 3. Avkastningsnivåer per hektar för potentiella fibergrödor och björk. I fall i vilka inga uppgifter om fiberavkastning hittades visas andel av massafractionen istället [1-9, 34]. Totala avkastningsnivåer motsvara vad som har hittats i fältförsök. Eftersom fältförsök oftast överskattar avkastningsnivåer bör figuren anses vara av orienterande karaktär (se också 13.2).

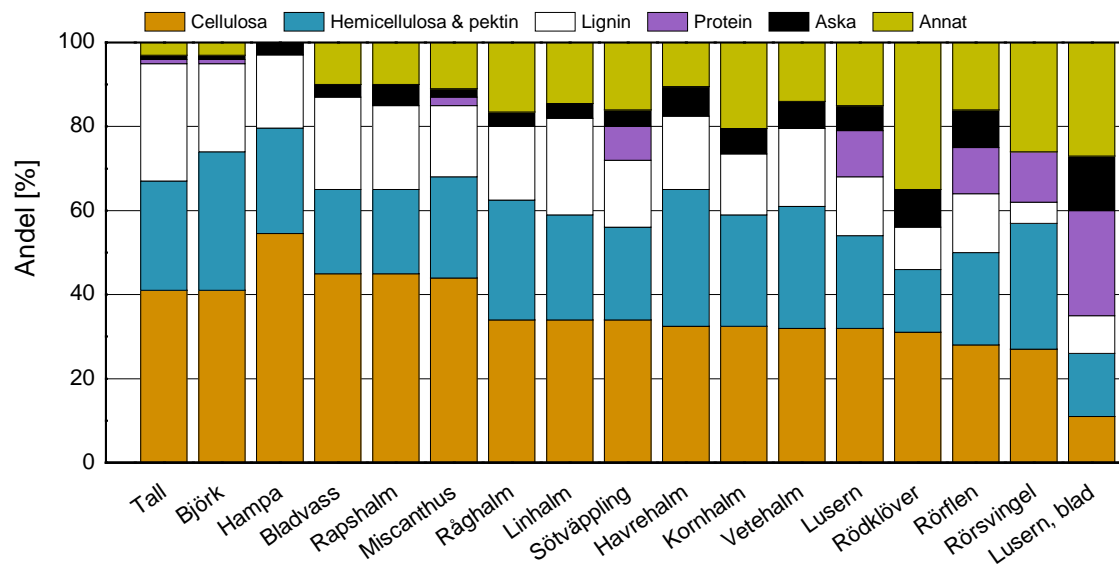
Rörflen har en hög andel fibrer som kan jämföras med andra gräsarter såsom foderlost och rörsvingel och med vetehalm. Den kan överträffa även fiberavkastningen av ved, t.ex. från björk (Figur 3). Allmänt har baljväxter (lusern, rödklöver, getärt och sötväppling) en mindre andel fiber (Figur 3 & Figur 4).



Figur 4. Relativ massaavkastning för potentiella fibergrödor och björk [1, 12, 35].

11.2 Sammansättning av biomassan

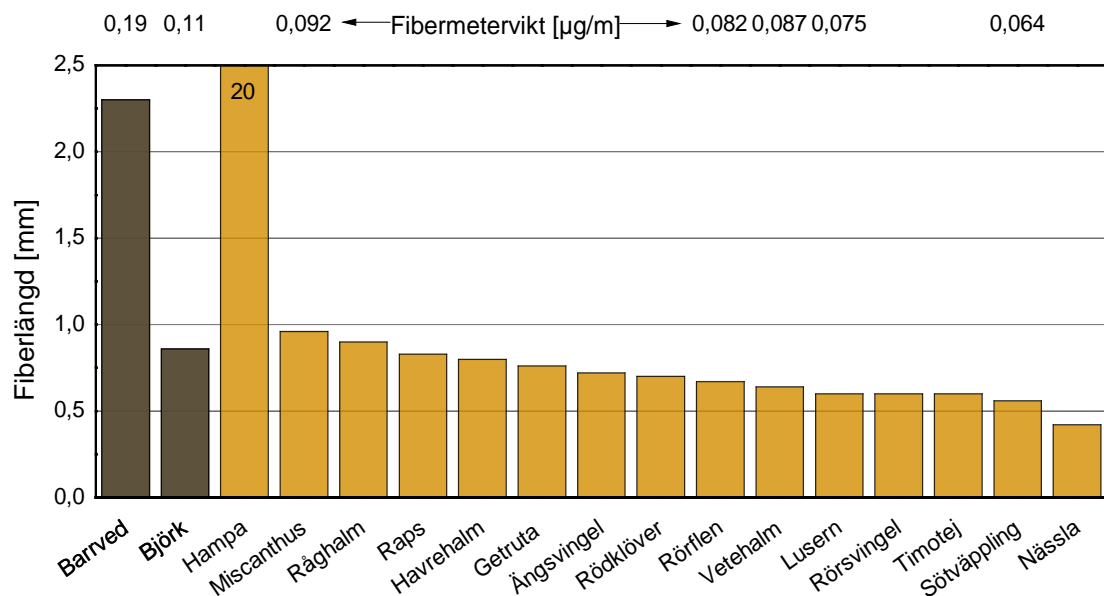
Andelen cellulosa, hemicellulosa och lignin varierar mellan olika grödor (Figur 5). Andelen cellulosa innehåller alla fibrer som kan utvinnas. Andelen protein och aska ska vara lågt, eftersom de kan orsaka problem i massaprocessen och i kemikalieåtervinningen [36].



Figur 5. Typisk sammansättning av ett urval potentiella fibergrödor i jämförelse med tall och björk [12, 13, 27, 37, 38]. Värden för rörflen avser höstskördad biomassa.

11.3 Fibergeometri

Fiber från agrogrödor (t.ex. rörflen, elefantgräs och lusern) påminner om lövvedsfiber och är relativt korta (Figur 6) samt tunnväggiga [29].



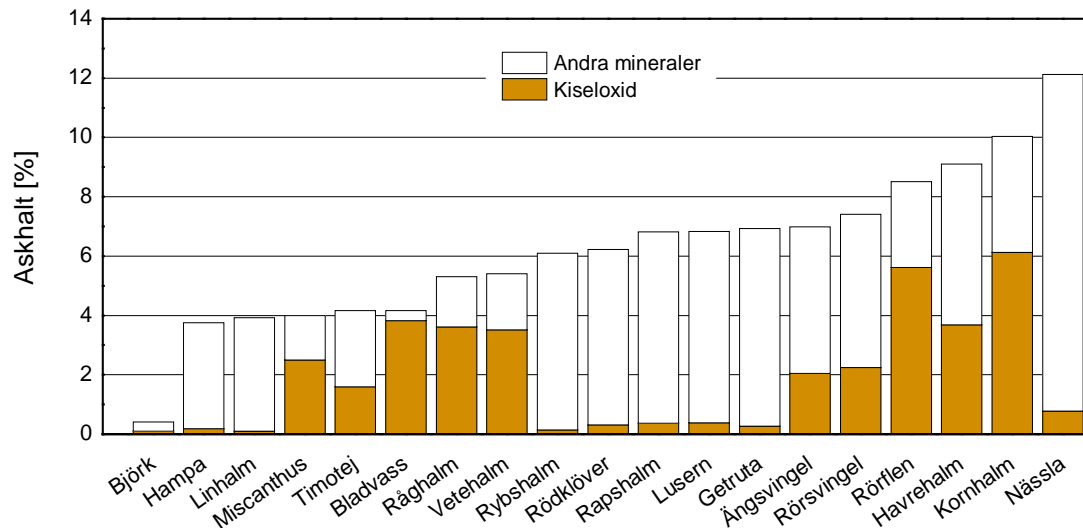
Figur 6. Typiska värden för medelfiberlängd och fibermetervikt för ett urval av potentiella fibergrödor i jämförelse till barrved och björk [12, 13, 25, 29].

Det är dock viktigt att beakta att dessa värden har plockats från olika publikationer som kan ha använt olika analysapparater för mätningarna. Det förekommer stora avvikelser beroende på vilken analysator som används [39].

11.4 Askhalt

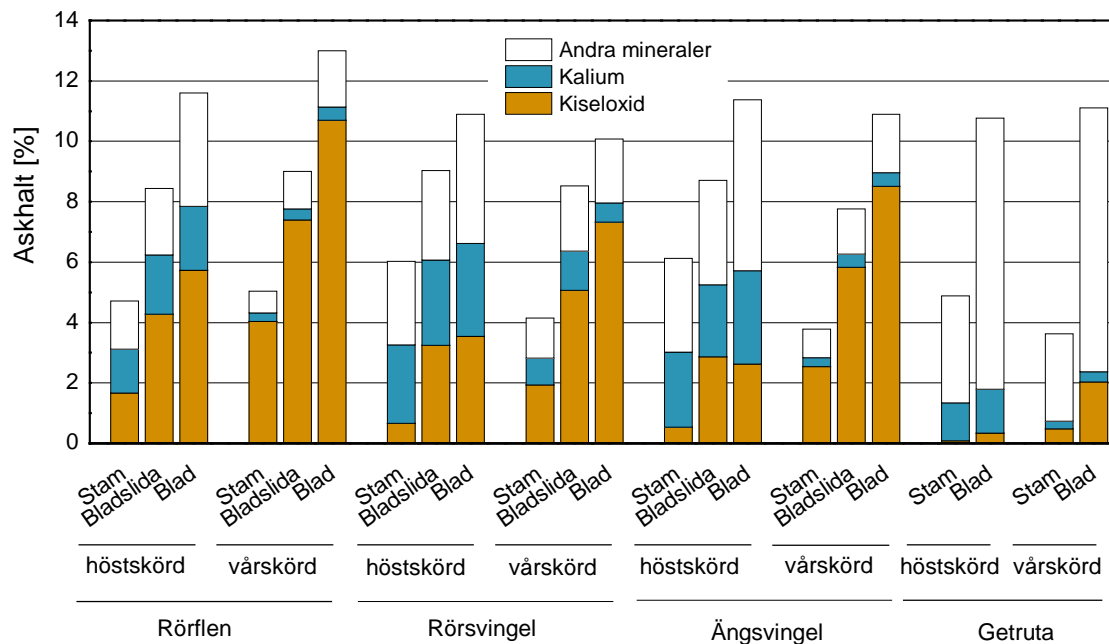
Ettårsgrödor har förhållandevis ofta stora mängder processfrämmande ämnen såsom kisel och kalium som ger problem i den del av massabruket där man tar tillvara och återvinner energi och kemikalier [29].

Halter av önskade mineraler är generellt högre för jordbruksgrödor jämfört med träråvaror. Detta styrks av en finsk studie om har undersökt nya grödor för pappersproduktion [12]. De fann även en skillnad mellan enhjärtbladiga växter (gräsarter) och tvåhjärtbladiga växter (Figur 7).



Figur 7. Typiska värden av askhalt för ett urval av potentiella fibergrödor i jämförelse med björk [12, 38]. Mer detaljerade uppgifter om halter av SiO_2 , Fe, Mn, Cu och N kan hittas i samma referenser.

Askhalten varierar mycket mellan grödorna. Generellt har jordbruksgrödor en mycket högre askhalt än vedråvaror. Men även andelen kisel i askan varierar mycket. Kisel kan man avlägsna genom att bygga in ytterligare processteg i återvinningsanläggningarna vilket dock innebär ökade investerings- och driftskostnader. Kaliuminnehållet är ett mycket besvärligt problem som man idag inte riktigt vet hur man skall hantera. Här krävs ytterligare utvecklingsinsatser [29].



Figur 8. Variationen av askhalt mellan höst- och vårskörd och för olika växtdelar för ett urval av potentiella fibergrödor [12, 40]. Mer detaljerade uppgifter om halter av SiO_2 , Fe, Mn, Cu och N kan hittas i samma referenser.

Mineralerna i biomassan är olika fördelat mellan växtdelarna (Figur 8). Stammen har oftast en mycket lägre askhalt än bladslida (hos gräsarter) och blad. Eftersom bladen innehåller även mycket mindre andel fiber är det intressant att undersöka möjligheter till separering av stam- och bladfraktionerna.

Även skördetidpunkten kan påverka askhalten (Figur 8). Askhalten minskar för grödor med höga halter av mineralämnen som kan lakas ur biomassan eller som växten omfördelar inför slutet av växtsäsongen, t.ex. kalium. Innehåller grödorna dock en hög andel kisel som koncentreras den upp, t.ex. pga. bladen vissnar. Detta kan leda till en ökat total askhalt, t.ex. för rörflen (Figur 8). Det har även visats att jordarten kan ha en betydande påverkan på askhalten i rörflen [41].

11.5 Kokning och blekning

Jämfört med ved är fibergrödor lättkokta och lättblekta [29]. Förbrukningen av kemikalier både vid kokning och vid blekning är mindre som utgör en fördel ur miljösynpunkt. Rent processmässigt ger inte ettårsgrödor några problem vid kokning och blekning.

Kokningsprocessen för gräsarter och spannmålshalm kan vara mycket snabbare (t.ex. 10-15 minuter) jämfört med kokning av trä (>90 minuter) [12].

11.6 Potentialbedömning och urval av lämpliga grödor

Baserade på vad som har sammanställts i detta kapitel har en översiktstabell skapats som sammanfattar de olika grödornas egenskaper (Tabell 1).

Fem grödor har valts ut för mer ingående analys. Vid urvalet, har vikten lagts på en hög avkastning av biomassa respektive massa och/eller fibrer. Betydelsen av kvalitetskriterier har ansetts vara mindre viktig i sambandet, eftersom kvalitetsparametrar kan potentiellt påverkas i mycket större omfattning än avkastningsnivåerna, t.ex. genom en förändrat skördestrategi eller en förbehandling.

De fem utvalda grödorna är rörflen, ängssvingel, rörsvingel, timotej och hampa. Dessa grödor har tidigare visats vara intressanta källor för fiber [12]. Trots god potentiell massaavkastning, har sötväppling inte tagits med i urvalet. Detta skedde pga. de ofördelaktiga fiberegenskaperna av sötväppling och tidigare negativa erfarenheter i kokningsförsök [13].

I följande kapitel kommer de fem utvalda grödorna att analyseras mer i detalj. För varje av de potentiella grödorna för fiber- och energiändamål beskrivs odlingssystemet och de vanliga insatsmedlen i grova drag. Dessutom anges uppgifter om logistikkedjor och de mest lämpliga transport- och förpackningsmetoder diskuteras. En enkel uppskattning av möjliga respektive bestående odlingsarealer görs för varje gröda.

Tabell 1. Bedömningen av olika agrogrödornas potential som fibergröda för odling i norra Sverige. Värdet för avkastning av biomassa, massa och fiber per hektar har anpassats till odlingsförhållanden i norra Sverige baserat på data från Finell, Xiong and Olsson [1], Gustavsson [2], Norgren and Ericson [3], Norgren and Ericson [4], Nyman [5], Ruth [6], SCB [7], Wisur [8], Wisur, Sjöberg and Ahlgren [9]. Värderingskriterierna visas längst ner i tabellen.

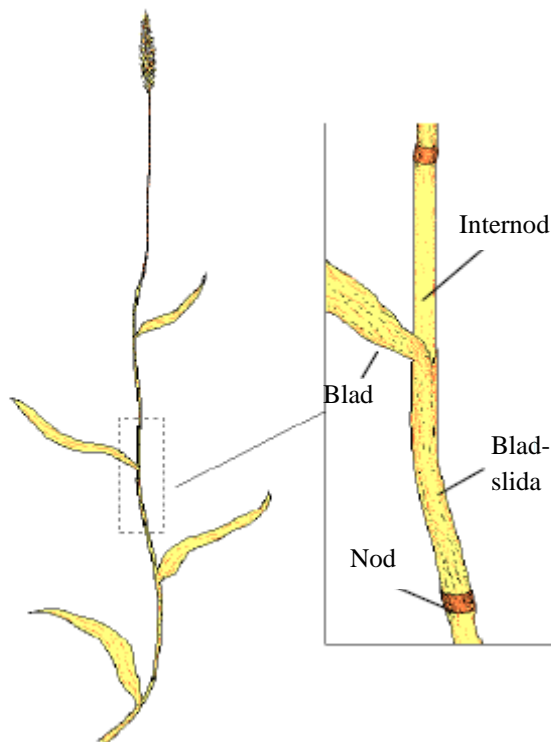
Gröda	Fiberavkastning [ton TS/ha]	Massaavkastning [ton TS/ha]	Biomassaavkastning [ton TS/ha]	Massaavkastning [% av biomassa]	Cellulosaandel [%]	Askhalt [%]	SiO ₂ -halt [%]	Fiberlängd [mm]
Rörflen	++	++	++	+	-	--	--	-
Ångsvingel		++	++	+		--	--	-
Rörsvingel	+	++	++	0	-	--	--	--
Timotej	-	++	++	-		-	-	--
Hampa	++	++	++	+	++	0	++	++
Sötväppling	-	++		0	0			--
Miscanthus	--	--	--	++	+	0	--	+
Linhalm		--	--	--	0	0	++	
Rågthalm		--	--	+	0	-	--	+
Rödklöver	--	-	+	--	-	--	+	-
Rapshalm		--	--	--	+	--	+	0
Rybshalm		--	--	--		--	++	
Getruta	--	--	-	--		--	+	-
Kornhalm		--	--	+	-	--	--	
Nässla		--	0	--		--	0	--
Havrehalm		--	--	0	-	--	--	0
Lusern	--	--	-	--	-	--	+	--
Vetethalm	--	--	--	0	-	-	--	--
Bladvass				+	+	--	--	
++	>110% björk	>150% björk	>150% björk	>100% björk	>110% björk	<0,5% askhalt	<200% björk	>300% björk
+	110%-100%	150%-100%	150%-100%	100%-90%	110%-90%	2%-0,5%	200%-400%	300%-100%
0	100%-80%	100%-80%	100%-80%	90%-80%	90%-80%	4%-2%	400%-800%	100%-90%
-	80%-50%	80%-50%	80%-50%	80%-60%	80%-50%	6%-4%	800%-1600%	90%-75%
--	<50% björk	<50% björk	<50% björk	<60% björk	<50% björk	>6% askhalt	>1600% björk	<75% björk

12 Potentiella fibergrödor

12.1 Rörflen (*Phalaris arundinacea*)

Gräset är en gammal kulturväxt som förr användes som foder. Rörflen trivs bäst på fuktiga marker, men ger god avkastning även vid odling på torrare jordar. Gräset är högvuxet och påminner i senare utvecklingsstadier om vass.

De flesta sorter av rörflen på marknaden blev framtagen för foderändamål. Vid användning av rörflen som biobränsle eller fiberråvara är kvalitetskraven delvis motsatta dem man ställer på ett bra djurfoder; bl.a. hög halt av fiber, men låg halt av mineralämnen [19].



Figur 9. Stjälkarna i rörflen är uppdelat genom noder i olika segment (internoder). Varje blad är bundet till stjälken genom en bladslida som omger stjälken från bladets botten ner till noden [42].

12.1.1 Odlingsspekter

Man bör så det i rena bestånd eftersom dess konkurrensförmåga är dålig vid etableringen. T.ex. har det testats blandningar av rörflen-klöver, men i vissa fall har klöver tagit över odlingsarealen och avkastningen av rörflen blev därmed marginell.

Förökningen sker sedan med underjordiska utlöpare (*rhizomer*), och efter några år är det mycket aggressivt mot ogräset, varför odlingen i princip kan vara permanent.

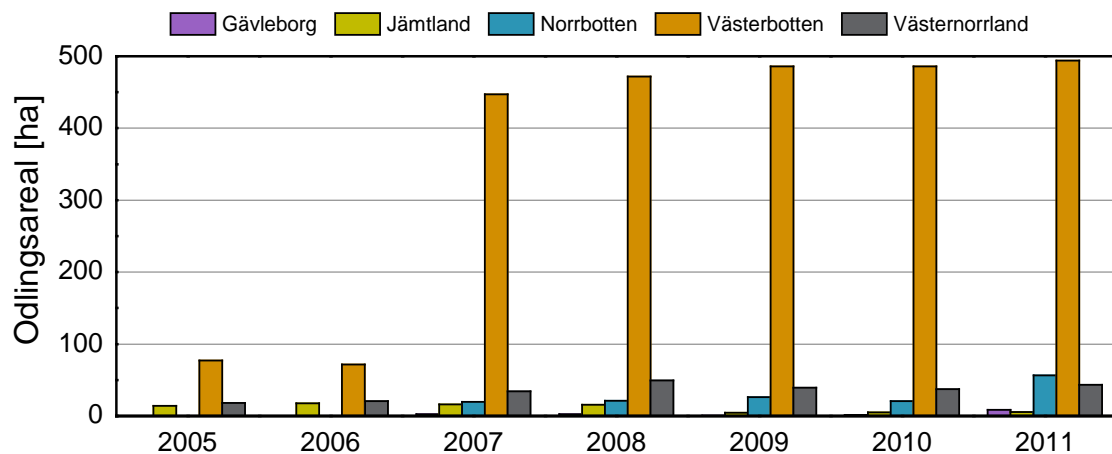
Vinterhärdigheten är mycket god, och rörflen kan därför med fördel odlas i Norrland [43].

Rörflen odlas som perenn vallgräs. Odlingstekniken motsvarar den som används för andra vallgräs t.ex. timotej. Gräset sås och efter etableringsåret kan den skördas årligen under ca 10 år. Ibland kan det krävas ett vilolår. Vidare tål gräset höga givor av kväve utan att lägga sig, och har god motståndskraft mot sjukdomar och skadedjur. Vid vårskörden kräver rörflen en kvävegiva av 40-80 kg/ha [44]. Ett antal olika sorter rörflen har undersökts med hänsyn till biomassa- och fiberavkastning med bara mindre skillnader i avkastning [12].

12.1.2 Odlingsareal

Rörflen kan odlas även på myrmark. Detta utnyttjas t.ex. i Finland var det odlas omkring 20000 ha rörflen årligen. De flesta myrmarksarealer i Sverige ligger dock inte i kustområden, men längre in i landet. Det finns också markytor som med hjälp av gårdsstöd har tagits ur produktionen (som träda) som kan vara intressant för odling av rörflen.

Rörflen odlas i Sverige främst i Norrland. Sedan 2007 finns en odlingsareal på drygt 500 ha i Norrland, huvudsakligen i Västerbotten (Figur 10).



Figur 10. Odlingsareal av rörflen i Norrland 2005-2011 [45].

12.1.3 Skördesystem

För skörd av rörflen finns följande metoder:

Höstskörd: Rörflenet klipps under hösten, strängläggs och pressas antingen i rundbalar eller samlas in löst. Höstskördad rörflen har en hög vattenhalt som är i medel 65 %, men kan variera mellan 45-85 % [46]. Höstskördad rörflen bör därför processas, ensileras eller torkas. Askhalten är i medel ca 5 %, men varierar mellan 2 och 12 % beroendet på vilken jordart den odlas på. Den höga askhalten är dock vanligtvis inte relaterat till föroreningar med jord, men består av mineraler, främst kisel, som plantan har tagit upp.

Under 80-talet visade försök att avkastningen blir högst vid två skördar per år, en i mitten av juli och en i september - oktober. Visserligen blir första skörden större vid en något senare tidpunkt, men förutsättningarna för fälttorkning försämras då.

Vårskörd: Rörflenet står kvar i fält fram till våren, där den skördas, pressas och lagras [18]. Gräset är då dött och torkar upp mycket snabbt efter regn så fort solen skiner och den relativa luftfuktigheten sjunker [43]. Vattenhalten är ofta mellan 10-25 % vid skörden [46], vilket gör att gräset är lagringsdugligt utan vidare torkning eller behandling. En alltför låg vattenhalt vid skörd ökar dock spillet, eftersom materialet blir sprött och lätt faller sönder i mindre beståndsdelar. Fibrerna anrikas samt extraktivämnen bortförs under vintern så att en bättre råvara för massaproduktion erhålls [18]. Detta syns bl.a. i en minskat bladviktsandel [18]. Vårskörd innebär också att näringsämnena i högre grad recirkulerar eftersom de näringsrika bladen faller av under den föregående hösten/vintern. Halterna av kväve, kalium, kalcium och magnesium är betydligt lägre under våren jämfört med hösten. Försök har visat att man bortför drygt hälften så mycket kväve och fosfor med grödan, och en femtedel så mycket kalium, då man skördar på våren jämfört med på hösten. Detta innebär att askhalten sjunker [43]. Vårskörden är dock mycket osäker pga. varierande snöbeläggning i fält och oftast otillräcklig markbäringhet för tunga skördemaskiner.

Höstskörd med vinterfältlagring: Rörflenet klipps under hösten, strängläggs, men sedan samlas in först under våren. Denna metod minskar risken för packningsskador i marken samt för avslagning av nya röflensskott [47]. Vid insamlingen pressas biomassa antingen i rundbalar eller samlas in löst. Detta medför att andelen blad i den totala biomassan sjunker, vilket minskar mängden biomassa som måste processeras. Detta alternativ undviker känsligheten vid vårskörden, men behåller de positiva egenskaper som låga mineralhalter som vid vårskörden. En nackdel med sen höstavslagning är att upptorkningen av materialet på våren i sträng går långsammare, t.ex. efter regn, på grund av att den höstavslagna strängen ligger närmare packad mot marken. Därför rekommenderas luftning av strängen före skörd numera [48]. I praktiken tar det ca en dag längre för höstslagen rörflen att bli skördetorr jämfört med vårslagen. Skördeförlusterna anses dock vara lika höga, runt 40 % [47].

12.1.4 Biomassa- och fiberavkastning

Biomassaavkastningen av rörflen har varit mycket hög vid olika försök, 8-12 ton TS per hektar, men vid praktisk odling är dock odlingsbetingelserna sämre och förlusterna större, varför man kan räkna med 4-8 ton TS per hektar [43]. Detta bestyrks i fältförsök som utfördes i Umeå i vilka biomassaavkastningen av rörflen har varit högst på organogena jordar. Under de första 7 åren var avkastningen 9 ton TS/ha i årsmedel vid höstskörd (gödningsnivå: 100 kg N/ha) utan tendens att avkastningen sjunker med planterings ålder [49]. Vid vårskörd var avkastningen på 7,5 ton TS/ha med en fukthalt på bara 15 %. På lerjordar sjönk biomassaavkastningen med ca 25 % vid både höst- och vårskörd. Vid norrländska förhållanden räknar man med att skörden, trots att man förlorar en del blad under vintern, blir högre vid vårskörd jämfört med (en) sommarskörd i augusti. Detta beror bl.a. på att man vid vårskörd även kan utnyttja tillväxten under hösten. Vid en skörd i augusti uppskattar man att den genomsnittliga bruttoskörden kan bli ca 8 ton TS/ha, och nettoskörden (då man tagit hänsyn till bärgningsförlusterna) ca 6 ton TS/ha [43]. I en annan studie i Umeå och Skellefteå uppnåddes 4-5 ton TS/ha bärgad skörd under tre växtsäsonger [50].

I en annan svensk studie har rörflen visats ha en hög avkastning av fiber (2,2 ton/ha) som överstiger även fiberavkastningen av björk [9]. Detta kan jämföras med en fiberavkastning i en finsk studie som resulterade i 1,7 ton/ha för höstskörd och 3,7 ton/ha för vårskörd i ett 5-årigt fältförsök i Finland (60°N). Biomassaavkastningen låg här i medel på 5,0 ton TS/ha för höstskörd och på 7,0 ton TS/ha för vårskörd. Fiberhalten² i biomassa var därmed högre under vårskörden (48 %) i jämförelse med höstskörden (36 %) [40]. Genom den fiberanrikning som sker fram till vårskörden så ökar också kokutbytet vid sulfatkok till omkring 50 %, vilket är i nivå med björkens på torrviktsbasis [18]. Fiberhalten var högst i stjälken in både höst- och vårskörd, men vårskörden resulterade i en mycket högre andel fiber i stjälken och bladslidan (Tabell 2). Detta kan förklaras med utvecklingen av växten som tenderar till utbildning av strukturförstärkande fiber.

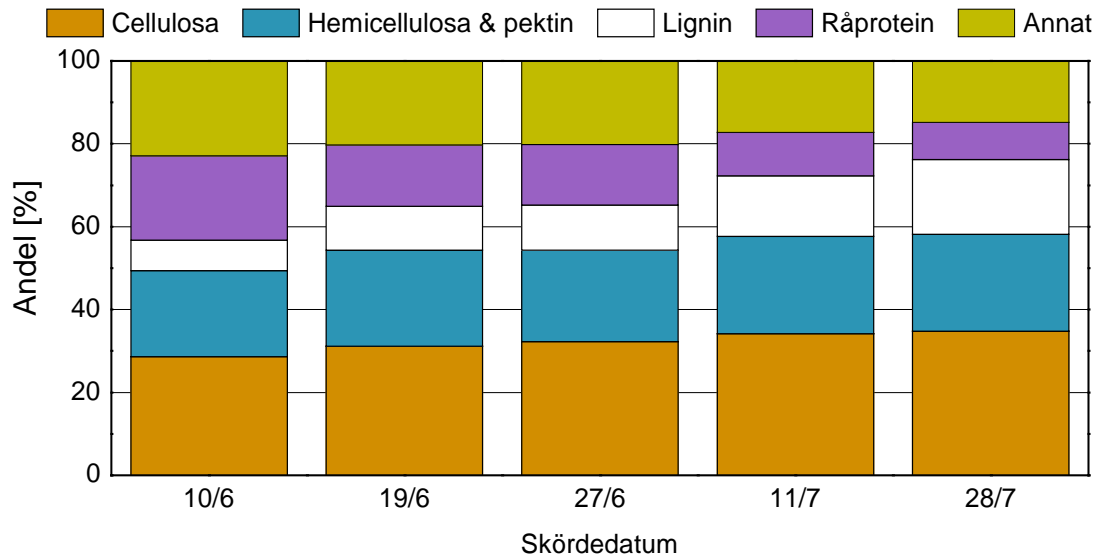
² Fiberhalten mätts som fraktionen av växttråd ('crude fibre') som inte löses i en syra-alkali behandling. Den har bestämts med hjälp av Fibertec system M, som består av varma och kalla extraktionsenheter. Provet kokades först i utspätt syra (H₂SO₄) och sedan i utspätt alkali (KOH). Extraktionsresten som innehåller cellulosa, någon hemicellulosa och lignin, vägts efter inaskningen vid 500°C. Växttrådsfraktionen ('crude fibre') är en mycket bra indikator för fiberutbytet i rörflen (Pahkala 1999).

Tabell 2. Fiberfördelning i olika plantdelar av rörfen [40].

	Själk	Bladslida	Bladskiva
Höstskörd	39,7	26,7	27,0
Vårskörd	52,1	39,8	30,1

12.1.5 Kemisk sammansättning

Ur fiberutvinningssynpunkt är en sen höstskörd att föredras eftersom fiberandelen i plantans biomassa är då högst samtidigt som biomassaavkastningen är högst (Figur 11).



Figur 11. Exempel på förändringarna i kemisk sammansättning av rörfen vid olika skördetidpunkter [27].

Fiberandelen i de olika växtdelarna av rörfen liknar den fördelningen man vanligtvis hitta i halm, medan ligninhalten är lägre i rörfen. Cellulosa anrikas i gräsets huvuddelar (internoderna), medan protein, aska och silikatandel är koncentrerat i noderna och bladen. Genom en enkel mekanisk fraktionering kan de olika växtdelar separeras [27]. Sammansättningen kan dock variera väsentlig (Tabell 3).

Tabell 3. Exempel på kemisk sammansättning hos olika delar av rörfen (höstskörd) och medel- och gränsvärden från 18 helväxtprover, angiven i % av TS [anpassat från 27].

Komponent	Internod	Nod	Blad	Medelvärde (n=18)	Gränsvär
Råprotein	5,1	7,9	15,1	14,9	7 – 21
Aska	4,2	4,0	8,9	6,7	6 – 9
SiO ₂	1,5	1,3	3,4	2,1	1,4 – 3,0
Cellulosa	37	30	28	27,1	24 – 32
Hemicellulosa	25	29	24	21,3	19 – 24
Lignin	15	13	12	13,8	11 – 17

Sammansättningen av polysackaridkomponenterna domineras av glukos, xylos och arabinos (Tabell 4). I helväxten dominerar glukosen, men i hemicellulosafraktionen dominerar xylosen.

Tabell 4. Andel av kolhydrater i rörlensprover som andel i torrsubstans [anpassat från 27, 51, 52].

Komponent	Theander, 1991	Finell, 2011; n=1		Sullivan, 1960	
		hela växten		hemicellulosafraktionen	
	n=18	Umeå (63°N)	Jokioinen (60°N)	1:a skörd sommar; n=3	2:a skörd höst; n=1
Glukos (H)	56	43	42	10,1	19,8
Galaktos (H)	1,6	0,3	0,9	6,5	6,2
Mannos (H)	0,3	0,1	0,2	i.u.	i.u.
Xylos (P)	32	19	19	71,5	61,5
Arabinos (P)	5,6	2,0	1,9	11,1	11,2
Ramnos (H)	0,2	0	0	0,8	1,3
Uronsyra (H)	4,3	i.u.	i.u.	i.u.	i.u.

H=hexos; P=pentos; i.u. = inga uppgifter

Koncentrationen av mineraler i de olika växtdelarna av rörlen varierar mycket (Tabell 5). Även skördestrategin påverkar mineralhalter avsevärt. T.ex. är halten av kalium mycket mindre i alla växtdelar under vårskörd, men samtidigt stiger halterna av kisel, koppar, järn och mangan signifikant [40]. Askhalten var dock nästan oförändrat mellan skördetidpunkterna. För att sänka askhalten kan tänkas att man testa skördevariant (c) ovan. Det är oklart om de stigande mineralhalter tyder på en förorening vid skörden som det har antyds för grässorter (äng- och rörsvingel) och getärten, men eftersom rörlen inte tenderar till liggskador är det osannolikt [40]. Istället är mineralhalter beroende av växtstadiet plantan befinner sig i och de tenderar att stiga med plantutvecklingen (dvs. vid senare skörd).

Tabell 5. Koncentrationer av utvalda mineraler i olika plantdelar av rörlen [40].

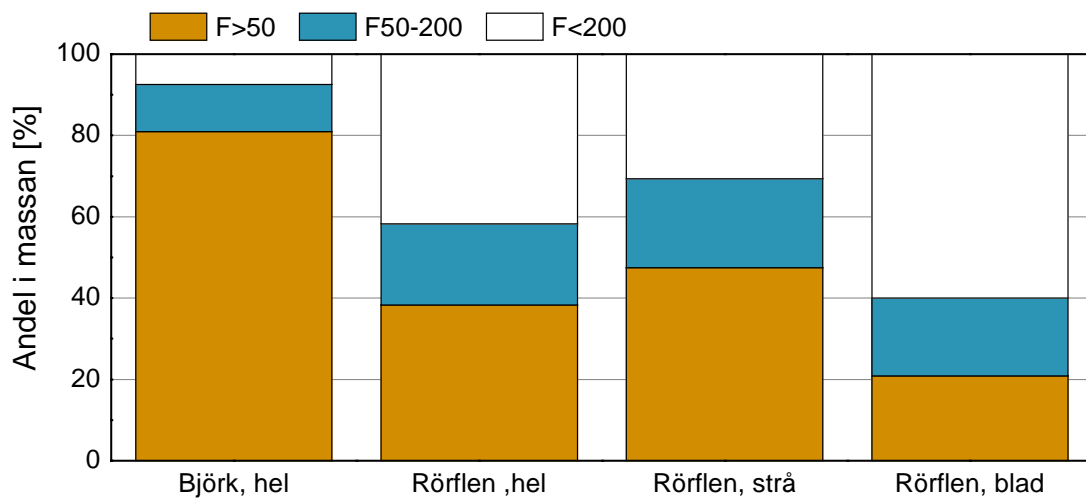
		Själk	Bladslida	Bladskiva
Askhalt (%)	Höstskörd	4,7	8,4	11,5
	Vårskörd	5,0	9,0	13,0
SiO ₂ (% av TS)	Höstskörd	1,7	4,3	5,7
	Vårskörd	4,0	7,4	10,7
K (g/kg TS)	Höstskörd	14,5	19,7	21,1
	Vårskörd	2,8	3,6	4,3
Cu (mg/kg TS)	Höstskörd	5,9	4,1	6,0
	Vårskörd	6,3	7,3	8,2
Fe (mg/kg TS)	Höstskörd	18,7	66,7	110,3
	Vårskörd	61,4	267,0	491,0
Mn (mg/kg TS)	Höstskörd	20,0	52,8	80,5
	Vårskörd	48,0	140,3	213,7

En finsk studie visar att halterna av aska, kisel, kalium och växttråd kan påverkas genom val av odlingsplats, skördetidpunkt och växtdelar för fiberutvinning [28]. Väljer man dock att använda t.ex. stjälken i vårskörd för att optimera fiberutbytet, så har det mindre halter av aska och kalium som följd, men också en högre halt av kisel.

12.1.6 Massa- och fiberegenskaper

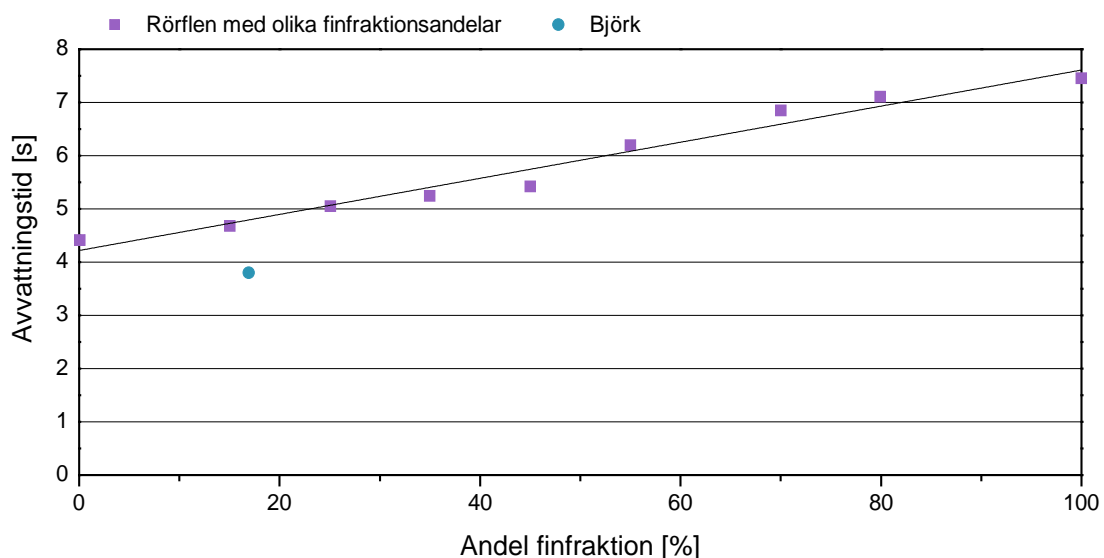
Massafraktionen F>50 (50 mesh = 50 maskor/tum) från rörlen innehåller i stort sett bara fiber, F50-200 är en blandning av celltyper, medan F<200 nästan enbart består av små icke-fiberceller (Figur 12) [8]. Därmed är andelen finfraktion i rörlensmassa mycket högre än i

björkmassa. Detta leder till att avvattningstiden av rörfbensmassa är betydligt högre än av björksulfatmassa [8, 53]. Avvattningsegenskaper i en konventionell finpappersmassa försämras även vid inblandning av 20 % rörfbensfibrer [29]. Styrkan förändrades dock inte genom inblandningen. Det är dock oklart i vilken omfattning erfarenheterna med produktion av pappersmassa från agrofibergrödor kan tillämpas även på produktion av dissolvingmassa.



Figur 12. Utbyte av fiberfraktioner från olika växtdelar hos rörflen. Blandandelen in hela växtens biomassa ligger kring 25 % [8].

Finfraktionen i rörflenblad är ca 60 % högre än i resten av biomassan, vilket medför en mycket längre avvattningstid för massan [9]. Avvattningstiden kan därför minskas genom avskiljning av bladen. Avvattningsegenskaper i en rörfbensmassa förbättrades avsevärt (från 32°SR till 25°SR) genom fraktionering (se kapitel 12.3) [54]. En fraktionering, dvs. mekanisk avskiljning av noderna och blad skulle då inte bara förbättra fibersammansättningen, utan minska även mängden finfraktion (Figur 13), aska och kisel i massan [8].



Figur 13. Avvattningshastighet av olika rörfbensmassor samt en typisk björkmassa som referens [9].

En studie som har undersökt sulfatkokningar av de olika växtdelarna av rörflen, har visat att stjälkarna har högst fiberavkastning och samtidigt den lägsta kappatalet och högsta ljusheten i jämförelse med de andra växtdelarna [28]. Massautbytet var runt 50 % vid kappatal 10, medan blad gav ett utbyte av ca 30-35 % vid högre kappatalen. Bladmassan hade en mycket låg ljushet, vilken ledde till en 5 % lägre utbyte och en 10 % lägre ljushet när hela plantan kokades [28]. Den viktade fibermedellängden var högst i stjälken (~0,9 m), men mycket lägre i bladslida (~0,6 m) och bladskiva (~0,5 m), påverkades dock bara i mindre utsträckning om hela plantan användes (~0,8 m) [28]. Fibertjockleken var runt dubbel så stor i bladskivorna (~0,18 mg/m), medan den var mycket mindre i både stjälkarna (~0,08 mg/m), bladslida (~0,10 mg/m) och om helplantan användes (~0,09 mg/m) [28].

Fiber- och massaegenskaper varierar mycket pga. odlings- och skördesystem, vald sort, väderförhållande, jordart, gödsling och även efterbehandling. Den årliga variationen är störst för många kvalitetsfaktorer [35]. Om rörflen vårskördas och fraktioneras kan kvalitetskriterier dock hållas inom rimliga gränser [35]. Det bör dock undersökas om detsamma gäller höstskörd med fältlagring fram till våren.

12.1.7 Möjligheter för energiproduktion

En integrerad fiber- och energianvändning av rörflen är möjligt. I ett bioraffinaderi på Bornholm används t.ex. en skivkvarn för att fraktionera bladen till en finfraktion, medan strået återstår som ”stickor” i fiberfraktionen. Processen kan dock bara används för torrt material (<15 % vattenhalt). Processen bygger på en fraktionering av olika växtdelar och bladen används då för produktion av etanol och strået till fiberproduktion.

Andelen biomassan som erhålls som biprodukt vid fraktioneringen kan förväntas ligga mellan 20-30%. Detta motsvarar ungefär 1,6–2,4 ton TS per hektar som kan användas för energiproduktion. Med ett effektivt värmevärde på 15 MJ/kg TS och en verkningsgrad av 90 % kan ca 22-32 GJ värme utvinnas per hektar.

Dessutom kan de hydrolysaterna av framförallt hemicellulosa tvättas ur kokvätska och jäsas till etanol. Glukos, xylos och arabinos är de mest vanliga kolhydrater i rörflensbiomassa [27, 51]. I hemicellulosafraktionen, som är huvudkällan till sockret i tvättvätska, dominerar dock xylosen.

Bladbiomassa kan även återföras till åkern vilket innebär en minskat krav på mineralgödsling. Energin i bladmassan tas dock inte hand om som om den hade används som t.ex. biogassubstrat eller fastbränsle. Alternativt kan bladmassan användas som fastbränsle. Halterna av mineralämnen i bladbiomassan vid vårskörd respektive höstskörd med vinterfältlagring är betydligt lägre än under hösten, men kan fortfarande vara höga. Detta kan kräva en anpassad panna för att undvika eventuella problem med beläggningar orsakat av askan. Askan som uppstår i processen kan användas som växtnäring. Det gäller främst fosfor och kalium, askan består dock av ca 80 % SiO₂.

12.2 Rörsvingel (*Festuca arundinacea*)

12.2.1 Odlingsaspekter

Rörsvingel är ett högväxt gräs som växer i stora kraftiga tuvor. De grova och styva stråna kan bli upp till en och en halv meter höga. Vipporna är mycket stora med långa hängande vippgrenar. Rörsvingel är ett nygammalt gräs som man har återupptagit odlingen av de senaste åren [55]. Rörsvingel ska helst sås i maj eller juni, en senare sådd leder till mycket mindre biomassa- och fiberavkastning [12]. Rörsvingel kan ofta skördas tre år, därefter behöver den sås om. Rörsvingel startar tillväxten tidigt på våren, men växer långsamt i början och har behov av mycket ljus [55].

12.2.2 Odlingsareal

Rörsvingel i renbestånd odlas på drygt 80 hektar i hela Sverige, främst i södra Sverige [56]. 2008 fanns det 3 odlare i hela Sverige, alla tre i Skåne, som odlade rörsvingel till fröproduktion [56].

12.2.3 Skördesystem

Förlusterna vid vinterskörd av rörsvingel var höga i en finsk studie; bara mellan 37-54 % av biomassan som var tillgänglig under hösten kunde bärgas [12]. Det är delvis grödans växtsätt som bidrar till dessa förluster, nämligen en potentiell mycket hög andel blad samt att stjälkarna klarade inte att stå upp under snölasten, men låg snötäckt på marken. Dessutom kan vinternskörden, om den är mycket försenad, skada de nya skotten i rörsvingel och därmed minska biomassatillväxten under den följande växtsäsongen. I Finland hann fukthalten sjunka under 15 % innan markbärigheten minskades genom tjällossning. Studien visade också att en sådan låg vattenhalt, som skulle vara gynnsam för lagring med minimala lagringsförluster, uppnåddes vid vinterskörd av rörsvingel under bara ett av studiens två år och bara på lerjord. Nederbörd under våren kan dock förskjuta skörden några veckor [12]. En förskjutning tills de nya skott har blivit större än 20 cm kan dessutom försämra biomassans kvalitet genom stigande fukt- och mineralhalt.

Klipphöjden vid vårskörd påverkar biomassaavkastningen signifikant. En stubbhöjd på 5 cm ledde till en 30 % högre avkastning jämfört med en stubbhöjd på 10 cm. Denna effekt förklarades med delvis förlusten i stubben och delvis med förhöjda förluster vid upplockning [12].

Med hänsyn till de stora skördeförlusterna och den relativt höga vattenhalten i biomassan av rörsvingel är det tveksamt om vinterskörd av rörsvingel är ekonomisk hållbar. Alternativ är en eller två skördar under sommaren respektive hösten. Vid skörd mellan juni och augusti var TS-halten 28-41 % [12], vilken kan anses vara lämplig för ensileringen av biomassan. Gräset kan klippas med befintlig vallskördeteknik samt fälttorkas för att uppnå TS-halter som är gynnsamma för ensilering. Fälttorkat rörsvingel kan kompakteras och ensileras i rundbalar, dock är de pga. hög vattenhalt oekonomisk att transportera. Detta understryker behovet av torkning inför transport. Fälttorkning av gräsbiomassa till acceptabla fukthalter för lagring medför oftast stora förluster omkring 20 % [57]. Det är också svårt att torka hela balar pga. deras höga densitet [57]. Eftersom det är dyrt att torka biomassa bör det undersökas om torkningen kan kombineras med kompakteringen till t.ex. briketter eller pellets. Det antyds dock i litteraturen att även här krävs ganska låga vattenhalter mellan 15 och 25 % [58].

12.2.4 Biomassa- och fiberavkastning

Avkastningen i Mellansverige ligger runt 7,2 ton TS/ha [8]. I nordsvenska sortförsök har en avkastning på 8,4 ton TS/ha demonstrerats [3], men efter justering för skördeförluster hamnar

skördemängden på ungefär samma nivå. En finsk studie visade att biomassaavkastningen var högst vid skörd i augusti vid frömognad (6,9 ton TS/ha) [12]. Det visades också att rörsvingel kunde skördas två gånger om året (i detta fall i juni och oktober), som sammanlagd resulterade i en högre avkastning (10,9 ton TS/ha). Detta återspeglas i fiberavkastningen per hektar. Fiberhalten var ca 20 % högre för vinterskördad rörsvingel. Det bör dock beaktas att avkastningen varierades mycket mellan åren. Vinterskörd av rörsvingel ledde till stora biomassafluster oavsett plats eller år, som varierade mellan 37 och 54 % [12].

Biomassafördelningen på de olika växtdelar visar att stjälken som innehåller de flest fibrer har en andel på ca 27 % av biomassa vid höstskörd, men bara 21 % vid vårskörd (Tabell 6).

Tabell 6. Biomassafördelning i olika plantdelar av rörsvingel i ton TS/ha [40].

	Själk	Bladslida	Bladskiva	Vippa	Total
Höstskörd	1,8	0,8	3,4	0,5	6,5
Vårskörd	1,1	0,7	3,3	0	5,0

12.2.5 Kemisk sammansättning

Sammansättningen av polysackaridkomponenterna i hemicellulosafraktionen och helväxten av rörsvingel domineras av glukos, xylos och arabinos (Tabell 7).

Tabell 7. Andel av kolhydrater i hemicellulosafraktionen respektive helväxten av rörsvingelprover [52, 59, 60].

Fraktion	Sullivan (1960)	Fowler (2003)	Morrison (1980)	
	hemicellulosa [% av TS]	hela växt [% av TS]	Blad [% av neutrala sockrar]	Stjälk
Glukos	11,1	20,0-24,0		
Galaktos	4,7	0,9-1,3		
Xylos	72,9	11,2-14,4		
Arabinos	9,6	2,5-3,1		
Ramnos	1,6	0,1-0,2		
Mannos	i.u.	0,2		
Uronsyror	i.u.	3,1-4,2		
Lignin	-	9,1-15,0	3,0-5,6	3,4-8,0
Hemicellulosa	-	24,6-28,1	12,4-19,4	16,2-20,1
Cellulosa	-	19,3-21,8		

i.u.=inga uppgifter

Askhalten av rörsvingel är mycket högre i höstskördad biomassa (8,5–9,5 %) jämfört med vårskördad biomassa (4,4–5,2 %) [12]. Detta beror både på att koncentrationer av mineraler är högre under hösten men även att andelen mineralrika blad i hela biomassan är mycket högre (Tabell 8). Koncentrationen av kalium är mycket lägre under våren, medan koncentrationer av kisel, koppar, järn är högre.

Tabell 8. Koncentrationer av utvalda mineraler i olika plantdelar av rörsvingel [40].

		Själk	Bladslida	Bladskiva
Askhalt (%)	Höstskörd	6,0	9,0	10,9
	Vårskörd	4,2	8,5	10,1
SiO ₂ (% av TS)	Höstskörd	0,7	3,2	3,5
	Vårskörd	1,9	5,0	7,3
K (g/kg TS)	Höstskörd	25,9	28,3	30,8
	Vårskörd	8,8	13,1	6,3
Cu (mg/kg TS)	Höstskörd	2,5	2,2	3,6
	Vårskörd	4,7	4,9	6,7
Fe (mg/kg TS)	Höstskörd	15,7	48,0	92,0
	Vårskörd	68,1	148,3	477,3
Mn (mg/kg TS)	Höstskörd	35,7	97,4	105,1
	Vårskörd	62,7	175,7	186,0

12.2.6 Massa- och fiberegenskaper

Massautbytet vid kokning av rörsvingel ligger runt 38-42 % [12]. Massan består av ca 50 % fiberfraktion (F<50), 24 % F50-200 och 26 % F>200 [8]. Massautbytet var dock runt 21 % lägre vid tidigt höstskörd [12]. Kappatalet var lågt med värden mellan 10,2-12,6 (björk 17-20). Fiberlängden var 0,6 mm som motsvarar ca 70 % av fiberlängden i björk.

12.2.7 Möjligheter för energiproduktion

Liksom rörflen skulle gräs som rörsvingel kunna fraktioneras för att bortföra växtdelar som innehåller höga halter av oönskade ämnen samtidigt som man höjer fiberutbytet i massan och minska mängden kokkemikalier som behövs för massaproduktion. Stjälkandelen i torrsbstansen i rörsvingel är runt 28 % i höstskörd och 22 % i vårskörd, som kan jämföras med 50 % i höstskörd och över 60 i vårskörd av rörflen [12]. Därför är det rimligt att anta att andelen bi-produkt som skulle bortföras i en fraktioneringsprocess skulle vara mycket högre för rörsvingel jämfört med rörflen (20-30 %). Om man antar att bi-produkten har en andel av 40-50 % vid höstskörd, motsvarar detta ungefär 3,4–4,2 ton TS per hektar som kan användas för energiproduktion. Med ett effektivt värmevärde på 15 MJ/kg TS och en verkningsgrad av 90 % kan ca 52-65 GJ värme utvinnas per hektar.

Dessutom kan hydrolisaterna av framförallt hemicellulosa tvättas ur kokvätska och jäsas till etanol. Glukos och xylos är de mest vanliga kolhydraterna i rörsvingels biomassa [52].

12.3 Ängssvingel (*Festuca pratensis*)

12.3.1 Odlingsaspekter

Ängssvingel är ett hårdigt gräs som passar på de flesta jordar, även på styvare leror. Mulljordar bör dock undvikas. Jordarna måste vara fria från kvickrot. Gräset växer som en lös tuva utan utlöpare. Ängssvingel kan vanligtvis skördas två till tre år, därefter behöver den sås om. Ängssvingel har ett mycket stort behov av ljus under etableringen. Ängssvingel bör gödslas både höst och vår. Om ängssvingeln etableras bra kan nästan samma skördenivå uppnås i ekologisk odling som i konventionell [61]. Ängssvingel ger högre återväxt och än timotej. Sortskillnaderna är mindre än i timotejsortimentet [3, 4].

Eftersom fröna drösa medan strået fortfarande är grön [61], följer oftast inga fröer med vid skörd i augusti eller senare.

12.3.2 Odlingsareal

Ängssvingel i renbestånd odlas i Sverige för fröproduktion. Arealen uppgick till 450 ha under ekologisk odling [61]. Ängssvingel är också en viktig art i fröblandningar för fodervallar som odlas på mycket stora arealer.

12.3.3 Skördesystem

Ängssvingel kan skördas med en vanlig strängläggare och sedan pressas i balar. Eftersom den liknar rörsvingel är det sannolikt att samma uppgifter gäller som beskrevs under kapitel 11.2.3. Detta bör dock undersökas närmare i praktiska försök.

12.3.4 Biomassa- och fiberavkastning

I sortförsök i norra Sverige har höga biomassaavkastningar mellan 7,6 och 8,2 ton TS/ha demonstrerats för olika ängssvingelsorter som kan jämföras med nivåerna för timotej [4]. I finska försök (60-66°N) har liknande avkastningar uppnåtts [62].

Biomassafördelningen på de olika växtdelar visar att stjälken som innehåller de flest fibrer har en andel på ca 32 % av biomassa vid höstskörd, men bara 20 % vid vårskörd (Tabell 9).

Tabell 9. Biomassafördelning i olika plantdelar av ängssvingel i ton TS/ha [40].

	Själk (ton/ha)	Bladslida (ton/ha)	Bladskiva (ton/ha)	Vippa (ton/ha)	Total (ton/ha)
Höstskörd	1,2	0,6	1,5	0,4	3,8
Vårskörd	0,4	0,3	1,3	0	2,0

12.3.5 Kemisk sammansättning

Sammansättningen av polysackaridkomponenterna i hemicellulosafraktionen och helväxten av ängssvingel domineras av glukos, xylos och arabinos (Tabell 10).

Trots att det inte finns någon skillnad i askhalten av ängssvingel mellan höstskördad och vårskördad biomassa (9 %) så är askhalten i den för fiberproduktionen intressanta stjälkfraktionen mycket lägre vid vårskörd (Tabell 11) [40]. Koncentrationen av kalium är mycket lägre under våren, medan koncentrationer av kisel, koppar och järn är högre.

Tabell 10. Andel av kolhydrater i hemicellulosafraktionen av ängssvingelprover [59, 60].

Komponent	Fraktion	Fowler (2003)		Morrison, 1980
		hela växt [% av TS]	blad [% av TS]	stjälk [% av TS]
Glukos		21,3-26,4		
Galaktos		0,5-1,7		
Xylos		10,2-15,5		
Arabinos		2,6-3,2		
Ramnos		0,1-0,2		
Mannos		0,1-0,4		
Uronsyror		3,1-3,3		
Lignin		10,3-19,0	2,4-3,4	2,9-7,4
Hemicellulosa		23,1-26,7	11,3-20,2	14,7-27,0
Cellulosa		20,2-23,2		

Tabell 11. Koncentrationer av utvalda mineraler i olika plantdelar av ängssvingel [40].

Komponent		Själk	Bladslida	Bladskiva
Askhalt (%)	Höstskörd	6,1	8,7	11,4
	Vårskörd	3,8	7,8	10,9
SiO ₂ (% av TS)	Höstskörd	0,5	2,9	2,6
	Vårskörd	2,5	5,8	8,5
K (g/kg TS)	Höstskörd	24,9	23,9	30,9
	Vårskörd	3,0	4,3	4,5
Cu (mg/kg TS)	Höstskörd	4,2	3,3	6,8
	Vårskörd	5,7	8,5	12,1
Fe (mg/kg TS)	Höstskörd	25,3	55,5	131,0
	Vårskörd	157,3	391,7	1 176,3
Mn (mg/kg TS)	Höstskörd	42,5	84,7	83,5
	Vårskörd	63,4	117,7	149,7

12.3.6 Massa- och fiberegenskaper

Massautbytet vid kokning av ängssvingel ligger runt 40-46 % [12]. Massautbytet var dock drygt 12 % lägre vid tidigt höstskörd. Kappatalet var lågt med värden mellan 12,0-13,0 (björk 17-20). Fiberlängden var 0,72 mm som motsvarar ca 84 % av fiberlängden i björk.

12.3.7 Möjligheter för energiproduktion

Liksom rörflen skulle gräs som ängssvingel kunna fraktioneras för att bortföra växtdelar som innehåller höga halter av oönskade ämnen samtidigt som man höjer fiberutbytet i massan och minska mängden kokkemikalier som behövs för massaproduktion. Stjälkandelen i torrsubstansen i ängssvingel är runt 32 % i höstskörd och 20 % i vårskörd, som kan jämföras med 50 % i höstskörd och över 60 i vårskörd av rörflen [12]. Därför är det rimligt att anta att andelen biprodukt som skulle bortföras i en fraktioneringsprocess skulle vara mycket högre för rörsvingel jämfört med rörflen (20-30 %). Om man antar att biprodukten har en andel av 40-50 % vid höstskörd, motsvarar detta ungefär 3,2-4,0 ton TS per hektar som kan användas för energiproduktion. Med ett effektivt värmevärde på 15 MJ/kg TS och en verkningsgrad av 90 % kan ca 43-54 GJ värme utvinnas per hektar.

Dessutom kan hydrolysaterna av framförallt hemicellulosa tvättas ur kokvätska och jäsas till etanol. Glukos och xylos är de mest vanliga kolhydraterna i ängssvingelns biomassa [52].

12.4 Timotej (*Phleum pratense*)

12.4.1 Odlingaspekter

Timotej är en gräsart som förekommer i stora delar av Europa, norra Asien och Nordamerika, som odlas för användning som foder i tempererade regioner. Timotej är det viktigaste vallgräset i Norrland. Timotej ger störst produktion i första skörden. Den har god vinterhärdighet. Timotejens nackdel i ett tvåskördesystem är den svagare återväxten [3]. Timotej är ett tuvbildande gräs med upprättstående, styvt och bladbärande strå. Stråets bas är något lökformigt uppsvåld. Timotej är det fröslag som odlas på störst areal i Sverige både ekologiskt och konventionellt [63].

Timotej kan odlas på många jordar. Strået blir snart styvt och segt. Den sås och skördas med befintlig maskinutrustning för vallproduktion. Vid slåtter har gräset en fukthalt på ca 50-70 %. Fälttorkningen i sträng och utspridd har undersökts, men det är osäkert om väderförhållanden tillåter fälttorkning varje år. Förlusterna under fälttorkning kan förväntas ligga runt 10 %, men stora variationer förekom [64]. Vallens liggtid är ungefär 4-5 år, och odlingen anses som relativt okänslig för sjukdoms- och skadedjursangrepp [43].

12.4.2 Odlingareal

Timotej i renbestånd odlas i Sverige för fröproduktion. Arealen uppgick till 1100 ha under ekologisk odling [63].

12.4.3 Skördesystem

Timotej kan skördas med en vanlig strängläggare och sedan pressas i balar. Det är sannolikt att samma uppgifter gäller som beskrevs under kapitel 11.2.3. Detta bör dock undersökas närmare i praktiska försök.

12.4.4 Biomassa- och fiberavkastning

I Mellansverige har årliga biomassaskördar av runt 8,6 ton TS/ha uppnåtts, medan fiberavkastningen var runt ca 1,5 ton TS/ha, dvs. ca 17 % [9]. En annan studie fann biomassaavkastning för timotej mellan 6,3 och 8,8 ton TS/ha [64].

Biomassan av timotej består av 29-33 % cellulosa, 28-29 % hemicellulosa och runt 8 % lignin [65, 66]. Andelen cellulosa och hemicellulosa är något högre i stammen (38 respektive 30 %) jämfört med bladen (23 respektive 24 %) [65].

12.4.5 Kemisk sammansättning

Sammansättningen av polysackaridkomponenterna i hemicellulosafraktionen domineras av glukos, xylos och arabinos (Tabell 12).

Tabell 12. Andel av kolhydrater i hemicellulosafraktionen av timotejprover; n=2 [52].

Komponent	[% av TS]
Glukos	16,3
Galaktos	4,8
Xylos	68,8
Arabinos	9,1
Ramnos	0,9

Lignin- och hemicellulosahalten i timotejs stjälkar är högre än i bladbiomassan (Tabell 13).

Tabell 13. Andel av kolhydrater i hemicellulosafraktionen av timotejprover [60].

Komponent	Blad [% av TS]	Stjälk [% av TS]
Lignin	2,7-4,9	4,6-9,4
Hemicellulosa	12,1-20,1	13,6-29,8

Askhalten i timotej sjunker vid senare skörd, medan kiselhalten stiger (Tabell 14). Det finns inga uppgifter om hur timotej betar sig i vårskörd, dvs. om hur stor förlusterna är samt hur mineralhalten förändras.

Tabell 14. Mineralhalt av utvalda ämnen i timotej [12].

Komponent		40 % axgång	Frömognad
Aska	[%]	5,09	4,17
SiO ₂	[%]	0,88	1,60
Fe	[mg/kg]	53,6	130,7
Mn	[mg/kg]	38,0	57,3
Cu	[mg/kg]	42,2	3,46
N	[%]	1,10	0,73

12.4.6 Massa- och fiberegenskaper

Massautbytet vid kokning av timotej ligger runt 34 % [12]. Massan består av ca 42 % fiberfraktion (F<50), 18 % F50-200 och 40 % F>200 [8], den har alltså en mycket högre andel finfraktion än t.ex. rörsvingel. Massautbytet var inte känsligt för en tidig höstskörd [12]. Kappatalet var lågt med värden mellan 13,5-16,6 (björk 17-20). Fiberlängden var 0,6 mm som motsvarar ca 70 % av fiberlängden i björk.

12.4.7 Möjligheter för energiproduktion

Liksom rörflen skulle timotej kunna fraktioneras för att bortföra växtdelar som innehåller höga halter av oönskade ämnen samtidigt som man höjer fiberutbytet i massan och minskar mängden kokkemikalier som behövs för massaproduktion. Stjälkandelen i torrs substansen i ängssvingel är runt 32 % i höstskörd och 20 % i vårskörd, som kan jämföras med 50 % i höstskörd och över 60 i vårskörd av rörflen [12]. Därför är det rimligt att anta att andelen biprodukt som skulle bortföras i en fraktioneringsprocess skulle vara mycket högre för rörsvingel jämfört med rörflen (20-30 %). Om man antar att biprodukten har en andel av 40-50 % vid höstskörd, motsvarar detta ungefär 3,1-3,8 ton TS per hektar som kan användas för energiproduktion. Med ett effektivt värmevärde på 15 MJ/kg TS och en verkningsgrad av 90 % kan ca 42-51 GJ värme utvinnas per hektar.

Dessutom kan hydrolysaterna av framförallt hemicellulosa tvättas ur kokvätska och jäsas till etanol. Glukos och xylos är de mest vanliga kolhydraterna i timotejs biomassa [52].

12.5 Hampa (*Cannabis sativa* L.)

Hampa är en årlig växt som har kultiverats i tusentals år för produktion av fiber och frö [67]. Den har sitt ursprung i västra Asien och Indien och den första förekomsten av hampa i Nordeuropa var under 900-talet [68]. Över de följande århundraden hampafibrer användes för framställning av rep, seglar, tyg och papper, medan fröerna användes som proteinrik föda och foder. Import av andra fibersorter såsom sisal från Centralamerika och jute från Indien ledde till nedgången av hampaodlingen i Europa under 1900-talet [69]. 1961 förbjöds odlingen av hampa på grund av användningen av substansen tetrahydrocannabinol (THC) som drog. Medan nya sorter med låg-THC utvecklades medan odlingsförbudet gällde, ingen utveckling av skördeteknik skedde och kunskap om odlingen förlorades. När förbudet hävdes i den Europeiska Unionen och Kanada under 1990-talet, industrihampa återuppstod som resultat av förnyat intresse i naturfiber.

12.5.1 Odlingaspekter

Hampa behöver en väl förberedd såbädd, dvs. fri från perenner ogräs och växtrester, för att skaffa en begynnande fysisk miljö för de växande plantor och för tillräcklig bra kapillärvattentransport till jordytan [70]. Sådd av hampa innebär att fröerna läggs på ett djup av 2-3 cm med hjälp av en spannmålssåmaskin. Avkastningen minskar när fröerna läggs djupare [70].

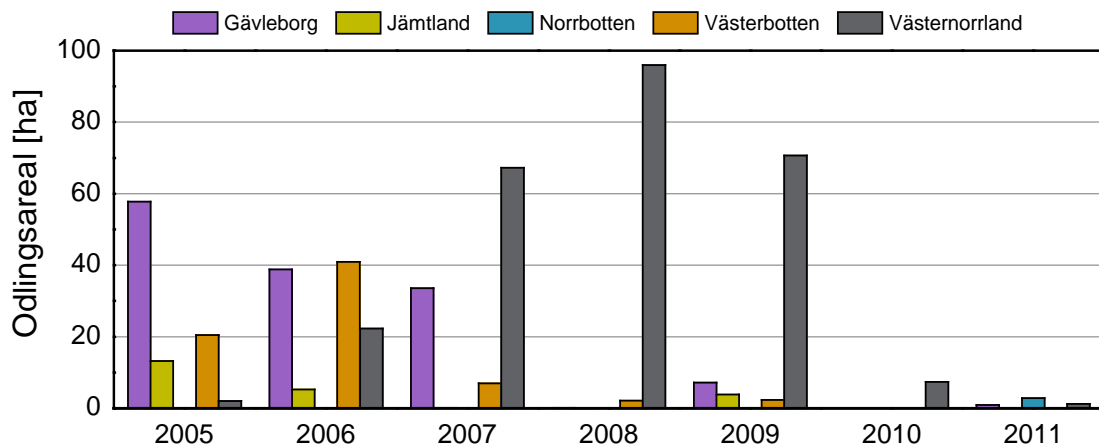
För produktion av fiber sås hampa tät, medan en låg plantdensitet önskas för fröproduktion [71]. Den ekonomiskt optimala densiteten för användning av hampa som energigröda är lägre än den densitet som ger högst fiberkvalitet [70]. Den högsta biomassaavkastningen, som skulle önskas för användningen av hampan för energiändamål, kräver ca 20 kg utsäde per hektar, medan en hampaodling optimerad för fiberkvalitet kräver ca 30-40 kg utsäde per hektar [72]. För att maximera fiberutbytet är valet av hampasorten viktig. Speciellt under förhållanden som i norra Sverige med mycket ljus under växtsäsongen, som dock begränsas starkt av en sen vår och en tidig vinter, har det visat sig att sorter som mognar sent kan bidra till högre biomassaavkastningar. Sena sorter dröjer med blomning och frösättning som brukar inleda en stopp på biomassan tillväxt och en omfördelning av plantresurser till fröproduktion.

Hampa är anpassat till samma klimat som vete, dvs. för tempererade och kalla förhållanden. Hampa växer bäst på väl-dränerade, bördiga, medium till tunga jordar, främst mjåla och lättlera [70]. Hampa kräver oftast ingen användning av herbicider eftersom den snabbt sluter bladtaket och därmed konkurrerar ut ogräset. Få insektsarter förekommer som skadedjur i hampa [73], och ingen av dessa orsakar ekonomiska skador [70]. En del svamp-sjukdomar förekommer, men är sällsynta [70].

Hampa kan växa upp till 5 meters höjd [71]. Fibrerna i industrihampa är primära och sekundära bastfiber (som förekommer i barken) och libriforma/korta fibrer (som förekommer i vedämnen). Tillsammans utgör dessa fibrer en andel av ca 35-38 % av den totala biomassan av hampa odlad för hög fiberkvalitet skördad under hösten [71, 74]. Bladen står för en andel av ca 30 % av den totala växtbiomassan under hösten [74], medan fröerna har en andel av ca 1-10 % i fiberhampa [71, 75].

12.5.2 Odlingareal

Industrihampa odlas i Sverige främst i Götaland. 2005-2009 fanns en odlingsareal på drygt 100 ha i Norrland (huvudsakligen i Västernorrland), men arealen har minskat reellt i dagsläget (Figur 14).



Figur 14. Odlingsareal av industrihampa i Norrland 2005-2011 [45].

12.5.3 Skördesystem

Hampan för fiberanvändning skördas vanligtvis under hösten, oftast innan fröerna mognar. Vattenhalten vid höstskörd av hampa är hög, mellan 70-80 %, vilket medför krav på torkning innan transport [76].

Grön hampa kan skördas med följande maskinsystem:

- Ett exakthack används för att klippa och hacka hampa. Biomassan samlas in löst och kan sedan ensileras för lagring. För dessa arbetsmoment används standardmaskiner, dvs. beprövat teknik.
- Ett modifierat exakthack används för att klippa hampa vid marknivån och sedan klipps plantorna i ca 50-60 cm långa bitar. Dessa bitar kan fälttorkas innan de tas upp och balas in en rund- eller fyrkantsbalpress. Detta torknings- och -beroendet på väderförhållande – röttningsprocess kan underlätta separering av bastfibrerna från vedämnen. För att maximera transportkapaciteten för fibrerna skulle hampafibrer separeras och sedan komprimeras i bal för vidare transport. Både den modifierade exakthacken samt fibersepareringen finns inte som standardmaskiner. Det finns dock exempel var t.ex. ett modifierat exakthack används med goda resultat. Fälttorkning kan vara kritisk, eftersom det är oklart om väderförhållanden tillåter det varje år.
- Det har tidigare visats prototyper av skördemaskiner som klipper hampaplantor vid marknivån och sedan separerar bastfibrerna och vedämnen direkt i fält. Fibrerna skulle kunna fälttorkas samt komprimeras i bal för vidare transport. Även om en sådan skördemaskin skulle underlätta processen betydligt finns dock ingen beprövad teknik tillgänglig.

Hampa kan även skördas på våren. I så fall lämnas hampan i fält fram till våren och skördas då torrt med en vattenhalt under 20 % [1, 76-78]. Fibrerna har då lossnats från stammen genom en frysningsprocess [79]. Detta medför dock en försvåring av maskinell skörd, eftersom de lossnade fibrerna kan enkla lindas sig runt roterande maskindelar och därmed orsaka högre skördekostnader. Liksom vårskörd av rörfilen så är väderförhållande i norra Sverige (snötäckning, markbärighet för maskiner) så pass osäker och kan starkt begränsa eller omöjliggöra vårskörd. Vid vårskörd har hampans blad vissnat och mineraler i dessa återförts till marken. Olika vårskörd av rörfilen så sjunker ask- och kiselhalten i hampans biomassa starkt vilket skulle underlätta återvinningen av kemikalier efter kokningsprocessen. Vårskördad hampa har en låg fukthalt (>15 %) som möjliggör lagring utan krav på ytterligare torkning. Detta är dock beroende på väderförhållanden och kan anses vara riskabelt. I så fall

kan hampan klippas och pressas i rund- eller fyrkantsbalar med en densitet på ca 120-150 kg/m³. Det är dock oklart hur vårskörd av hampa påverkar dess fiberkvalitet.

För hampa bör undersökas om höstskörd med vinterfältlagring kan vara möjlig.

12.5.4 Biomassa- och fiberavkastning

Biomassaavkastningar mellan 8 och 11 ton TS/ha med en stamandel på runt 80 % vid höstskörd av hampa har demonstrerats för odlingar >60°N i Sverige och Finland [78, 79].

Fiberutbytet i höstskördad hampa i ett svenskt labbförsök mätts till runt 45 %, bestående av cirka hälften långfiber och hälften kortfiber [1]. Finfraktionen (<150 mesh) i en ättiksyraperoxidupplösning hade en andel av mellan 30-50 %. Upprepningsbarhet av metoden bedömdes dock inte vara tillförlitlig [1].

Andel fibrer i en separeringsprocess visade en andel av ca 30 % fiber för både rötdad och orötdad hampa, medan vedämnen hade en andel av runt 65 % i rötdad och 60 % i orötdad hampa [80]. Resten består av damm. Längdfördelningen samt styrka relativ till finhet av fibrerna var lika mellan rötdad och orötdad hampa. Orötade fibrer var grövre och innehöll mer föroreningar [80]. Förutom en ekonomisk fördel innebär direktseparation en ljusare hampafiber [80].

Vid vårskörd är hampa torrt och stammarna kan knäckas vid maskinell skörd vilket kan medför stora skördeföruster av vedämnen [1, 81]. Biomassaavkastningen vid vårskörd av hampa i norra Sverige (>60°N) varierar mycket mellan 1- 5 ton TS/ha [1, 78, 79, 82]. Fiberandelen från en hammarkvarnseparering av vårskördade hampastjälkar är runt 30 % [79]. Med förlusterna under skörd och processen är fiberskörden runt bara 15 % av biomassan tillgänglig vid höstskörden och 19 % av biomassan tillgänglig vid vårskörd [79].

12.5.5 Kemisk sammansättning

Det har tidigare visats att fibrer i hampa har en relativ låg halt av lignin, 2-5 %, medan ligninhalten i vedämnena är relativ hög, 20-25 % [83]. Detta resultat styrks av andra studier som visar att cellulosahalten i hampa är högst i bastfibrerna, medan deras halt av hemicellulosa är relativt låg (Tabell 15).

Tabell 15. Kemisk sammansättning av hampa bast och vedämnen [71].

Kultivar	Skördedatum	Cellulosa		Hemicellulosa		Lignin	
		bastfiber	vedämnen	bastfiber	vedämnen	bastfiber	vedämnen
Fibrimon 56	1987-10-12	53,2	31,9	6,9	18,6	5,0	20,8
Fédora 19	1989-10-09	58,6	34,7	9,3	19,3	5,0	20,3
Kompolti Sárgaszárú	1989-10-09	69,2	31,5	8,5	16,8	5,5	20,1
Kompolti Sárgaszárú	1990-08-15	68,2	37,4	6,7	18,0	3,5	21,8
Kompolti Hybrid TC	1990-06-20	60,2	31,9	7,1	15,6	4,4	19,1
Kompolti Hybrid TC	1990-08-26	69,7	37,0	7,8	17,8	3,6	21,7
Kompolti Hybrid TC	1990-09-26	74,3	37,2	7,9	18,5	3,3	21,7

För att minimera problem och kostnader i samband med lignin nedbrytningen, skulle då fibrer och vedämnen separeras innan massakokningen. En låg ligninhalt som t.ex. i hampafibrer, brukar tyda på att kokningen skulle vara en enkel process. Det finns dock studier som har visat att inte bara halten, men lignin-fiber-strukturen i hampa spelar en stor roll, t.ex. i en alkalisulfitkoknings-process, vilket kan försvåra processen [83]. Sammansättningen av sockerarter i hampa domineras av glukos och xylos (Tabell 16).

Tabell 16. Andel av kolhydrater i hemicellulosafraktionen av rörsvingelprover [84-86].

Komponent	Lavouie, 2011	Marques, 2010	Correia, 2005
	[% av TS]	[% av neutrala kolhydrater]	[% av hemicellulosa]
Glukos	51	86,4	9,25
Galaktos	0,7	1,6	2,31
Xylos	14,3	1,0	15,82
Arabinos	1,3	0,6	0,51
Ramnos	i.u.	0,4	0,53
Mannos	1,5	8,8	2,68

i.u. = inga uppgifter

12.5.6 Massa- och fiberegenskaper

I sulfatkokningsförsök av hampa har det visats att man kan uppnå ett fiberutbyte omkring 60 % i en massa med låg kappatal om bara bastfibrerna används (Tabell 17). Detta understryks vikten av en tidig bastfiberseparering. Bastfibrernas fiberlängd översteg 7 mm [1], som redan har visats tidigare (Tabell 18).

Om hela hampastammen används i kokningen ligger fiberutbytet i samma klass som för barvedsmassa vid samma kappatal [1]. Fiberlängden i vedämnens massa är mycket lägre, omkring 0,55 mm, än för bastfibrerna (Tabell 17). För lövvedsmassa ligger detta värde på ca 1,0 mm. Andelen finmaterial för denna massa ligger på omkring 9 %, vilket är i samma nivå som för lövvedsmassa [1]. Fiberstyrka av en hampamassa beskrivs som bra [83]. Hampafibrer är också svårare att blekna [87]. Blekning av hampafiber beskrivs som svårt med en låg ljushet som resultat [83].

Tabell 17. Sammanställning av resultat från sulfatkokförsök och fiberanalyser på hampa [1].

Analys	Enhet	Hela stammen	Bastfiber	Vedämnen
Utbyte	% av råvara	41-47	59	40
Kappatal	-	22-34	6-7	-
pH i avlut	-	14	14	13,5
Restalkali	g/l	13-23	18-22	-
Aritmetisk medelfiberlängd	mm	-	-	0,43 - 0,47
Längdviktad medelfiberlängd	mm	-	-	0,52 - 0,59
Viktiktad medelfiberlängd	mm	-	-	0,60 - 0,73
Fibergrovhets	mg/m	-	-	0,079 - 0,119
Finmaterial, aritm. (< 0,2 mm)	%	-	-	8,98 - 9,07
Finmaterial, viktad (< 0,2 mm)	%	-	-	1,78 - 3,02
Antal fibrer/mängd massa	-	-	-	14243 - 24343

Tabell 18. Egenskaper av hampafiber in olika växtdelar [83].

	Fiber	Vedämnen
Fiberlängd [mm]	5-50 (20 i medel)	0,55
Fiberdiameter [μm]	10-50 (22 i medel)	22

12.5.7 Möjligheter för frö- och energiproduktion

Andelen biomassa som erhålls som biprodukt vid fraktioneringen kan förväntas ligga mellan 0-25%. Detta är räknat med antingen all biomassa kokas respektive bladbiomassa bortförs. Detta motsvarar ungefär 0-1,3 ton TS per hektar som kan användas för energiproduktion. Med ett effektivt värmevärde på 15 MJ/kg TS och en verkningsgrad av 90 % kan ca 0-18 GJ värme utvinnas per hektar.

Dessutom kan de hydrolysaterna av framförallt hemicellulosa tvättas ur kokvätska och jäsas till etanol. Glukos och xylos är de mest vanliga kolhydrater i hampans biomassa [85]. I hemicellulosafractionen, som är huvudkälla till sockret i tvättvätska, dominerar dock xylosen.

Hampans fröer är en intressant biprodukt. Det är dock osannolikt att rimliga skördar av frön uppnås i norra Sverige, även för tidig mognande hampasorter [79]. För hampasorten Finola³ har en manuell fröskörd av mer än 1 ton TS/ha uppnåtts under tre växtsäsonger, dock den maskinell bärgade fröskörden var mycket låg, omkring 100-600 kg TS/ha [1]. Stamskörden av sorten Finola är mycket mindre än andra sorter och varierar runt 2,0-3,5 ton TS/ha. Fiberavkastningen skulle bli därmed förmodligen mycket låg.

³ Hampasorten Finola är inte längre godkänd för odling i Sverige, pga. för höga halter av drogämnet THC. Finola är en sort som växer lite mer förgrenat och producerar mer frö som andra sorter. Det finns ett initiativ för en återgodkännande av sorten.

13 Möjligheter till förbehandling

I detta kapitel beskrivs möjligheter för förbehandling av rörflen, som kan förbättra kvalitén och ekonomin för rörflen som fibergröda. Även om exemplen bygger på försök som har genomförts med rörflen, ska förbehandlingar anses som potentiell relevant även för de andra fyra grödorna i denna rapport som har valts ut som potentiella fibergrödor.

Förbehandling av grödor till användning i massaproduktion kan ha ett antal mål, som delvis kan uppnås samtidigt. Mekaniska processer används ofta för att avskilja vissa plantdelar som har oönskade effekter i massaprocessen eller bidrar till en ökad förbrukning av kemikalier och energi. Biotekniska eller enzymatiska processer kan gynna massaprocessen på molekylnivå, t.ex. genom att förbättra kemikalietillgång till fibrerna eller nedbrytning av oönskat finmaterial. Tvättprocesser kan tänkas för att bortföra oönskade extraktivämnen som annars skulle kunna störa massaprocessen.

13.1 Kompaktering inför transport

Agrogrödor, speciellt när skördad med låg fukthalt, har oftast en mycket låg densitet.

13.1.1 Balning

Kostnader för transport och lagring är mycket beroende på biomassans densitet. Om biomassan från gräs och andra stråliknande grödor inte ska ensileras, kan den kompakteras i rund- eller fyrkantsbalar. Densiteten som kan uppnås ($130\text{--}180\text{ kg/m}^3$) är dock för låg för att fullt utnyttja lastkapaciteten vid transport på lastbilar [88]. Vid balning av rörflen kan densiteten höjas reellt, t.ex. från 69 till 91 kg/m^3 , vilket motsvarar en kompaktering med runt 30 % [89]. För olika rörflensfraktioner har balar med högre densitet producerats. Densiteten ökades från 90 till 180 kg/m^3 för internodfraktionen och från 130 till 210 kg/m^3 för bladfraktionen [90].

13.1.2 Brikettering

Brikettering av rörflen kan leda till en densitet mellan $290\text{--}720\text{ kg/m}^3$, dvs. en kompaktering med 320-940 % [47, 91-93]. Här utgick man dock från ofraktionerat biomassa, dvs. en blandning av stjälkar och blad [91]. Brikettering fungerar bra för rörflen. Det finns mobila anläggningar [93, 94], som kan användas vid fältkant för lokal brikettproduktion inför vidare transport

Brikettering innebär en förkortning av fibrerna [88]. Vätskor kan dock tränga in bra och briketter lösas upp i vatten. Densiteten höjdes från runt 110 kg/m^3 för fraktionerade rörflensinternoder till runt 350 kg/m^3 för färdiga briketter (jämfört med ”vanliga” träbriketter på 600 kg/m^3). Även med den lägre densiteten kan det vara ekonomisk hållbart att transportera rörflenbriketter, eftersom lastbilarnas kapacitet utnyttjas på både volym och lastvikt.

Hållfastigheten av briketter gjord av rörflen (internod-fraktionen) varierade mycket mellan de med låg densitet (full upplösning i hållfastighetstest) och de med hög densitet (viss upplösning likande träbriketter) [88, 91]. Detta kan leda till högre förluster under transport och lagring av briketterna.

Ungefär dubbelt så mycket massa kan produceras från ett lass briketterad rörflensflis än från ett lass färska björkstammar [88]. Dessutom kan briketter transporteras på elevatorband, något som är viktig i samband med fyllning av kokkärn i massaprocessen. Okomprimerat biomassa skulle förmodligen ställa till problem på branta elevatorband, vilket skulle leda till en mycket

förlängd fyllningstid. Dessutom kan lösa fibrer orsaka problem genom lindring runt roterande maskindelar.

Brikettering verkar inte påverka massaprocessen med hänsyn till massautbyte, avvattningstid, kappatal och viktat fiberlängd för rörfleksbriketter producerat vid en briketteringstemperatur av 60 °C eller mindre [88].

13.1.3 Pelletering

Vid pelletering kan densiteten av rörfelen höjas till 540-680 kg/m³ dvs. en kompaktering med 680-890 % [47]. Det är dock oklart hur pelletering påverka fiberkvaliten samt praktiska aspekter såsom inträngningsförmågan för luten, processen, etc.

13.2 Tvättning

Tvättning av biomassan i vatten kan användas för att få bort föroreningar såsom jordpartiklar och damm [25]. Grödor innehåller dessutom en relativ hög andel extraktivämnen. Dessa ämnen kan störa massaprocessen. I ett tvättningsmoment kan vattenlösliga extraktivämnen delvis separeras från fibrerna. Eftersom extraktivämnena oftast är lättnedbrytbar, t.ex. i en anaerob rötningsprocess, kan både kvaliteten av fiberråvarorna förbättras samt energi i form av biogas utvinnas. I ett experiment kunde halten av t.ex. kalium sänkas genom tvättning, medan halten av kisel inte förändrades [13], medan en annan studie använde tvättning som extra steg i processen för att minska kiselhalten ytterligare, t.ex. efter fraktionering [95]. Då har det visats att kiselhalten kan minskas med ca 30 % i en hydrapulper [95].

I rörfelen har tvättning ledd till en förlust av ca 10 % av biomassan och producerat stora mängder avloppsvatten som kräver rening. Däremot har massautbytet ökat och blekningsegenskaperna förbättrats [25]. Med den höga energiförbrukningen i form av ånga kan tvättning vara dock ekonomisk oattraktiv.

13.3 Fraktionering

Fraktionering av torr biomassa från agrogrödor kan anses vara en effektiv metod för att producera en fraktion som både har en högre fiberhalt samt en mindre halt av störande ämnen. Detta kan förklaras genom avskiljning av växtdelar som innehåller stora mängder växtnäringsämnen, t.ex. blad [96]. En sådan förbehandling fungerar för agrogrödor såsom rörfelen och spannmålshalm [27, 96], men det är oklart hur väl de fungerar för hampa och för gräsarter som timotej och svingel.

Metoder för fraktionering bygger mest på tormalning av materialet. Fraktioneringen beror på de olika fysiska beteendena av t.ex. blad och internod i malningsprocessen [96].

Den oönskade icke-fiberfraktionen av höstskördade grödor kan användas som biogassubstrat för energiutvinning. För vårdskördade grödor är användning av icke-fiberfraktionen som fastbränsle möjligt, men det kan finnas behov av en förbränningsanläggning som klara höga halter av lättsmältade askor.

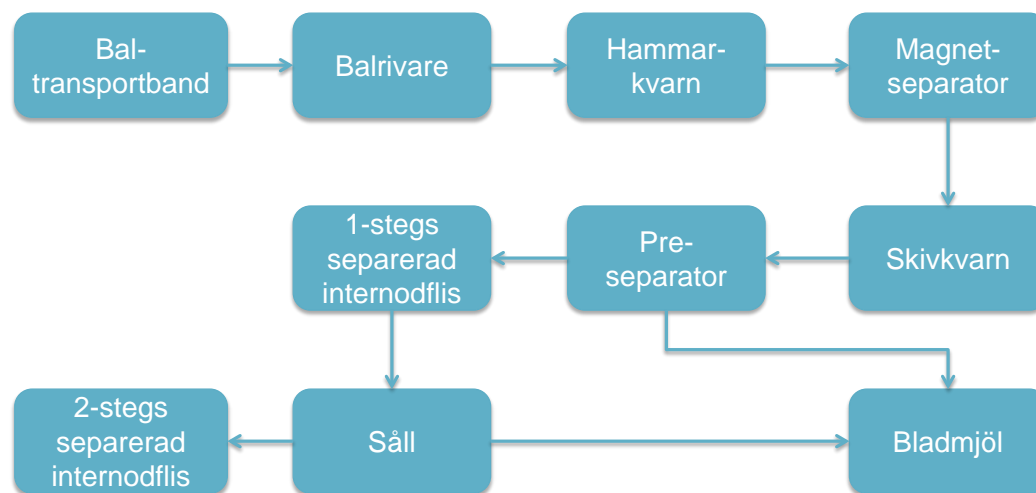
13.3.1 Luftfraktionering

En annan metod för fraktionering av torr biomassa för massaproduktion är luftfraktionering [12, 25]. I denna process mals biomassan i mindre bitar i en hammarkvarn. Sedan används en luftström för att separera föroreningar, t.ex. blad och damm, från stjälkarna. För rörfelen har det visats att ca 20 % av materialet förs bort i luftflödet. Detta ledde till ett högre fiberutbyte, längre fiber samt en lägre andel finfraktion i jämförelse med obehandlat rörfelen [25].

13.3.2 Mekanisk (torr-)fraktionering

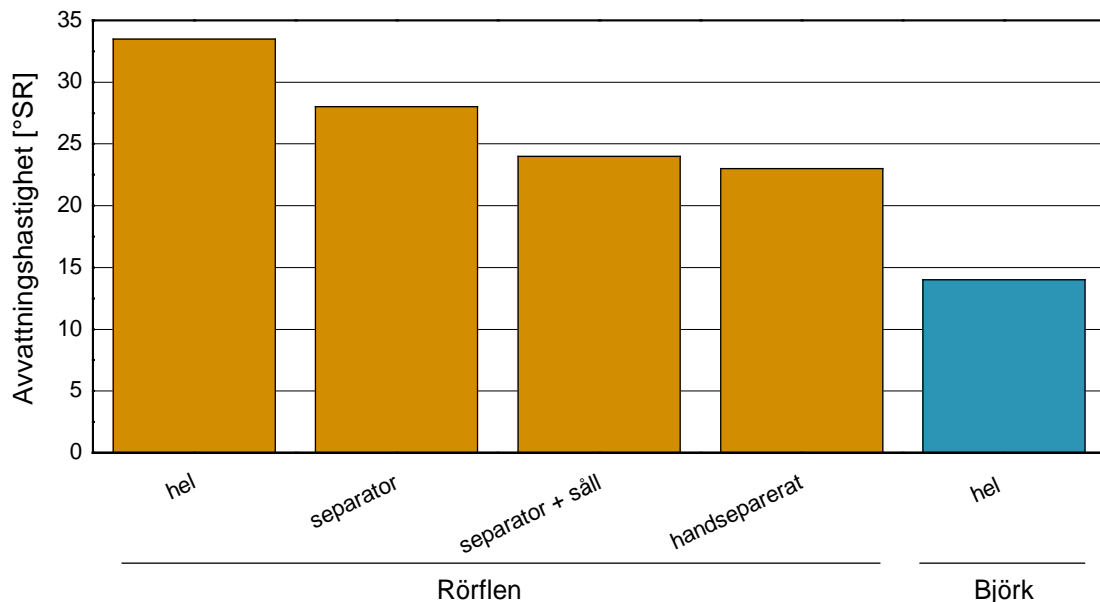
I mekanisk fraktionering används ett såll för separering av de olika fraktionerna istället för en luftström. På Bornholm Biorefinery har en sådan mekanisk fraktioneringsprocess utvecklats. Processen är designat för behandling av rörflen som kortas ner, hackas, malas i en skivkvärv och sållas (Figur 15). Blad, bladslida och föroreningar avskiljs och används för bioenergiproduktion [54]. Processen kräver en låg fukthalt, t.ex. för rörflen <15 % och fungerar alltså inte för höstskördad biomassa om den inte torkas innan fraktioneringen. För rörflen låg processkapaciteten runt 2500 kg/h [88].

Cirka 70 % av biomassan återfinns som cellulosaflis [97]. De avslagna fraktioner (blad, damm) som motsvarar ca 30 % av biomassan och kan användas som fastbränsle, t.ex. som pellets. Förbränningstekniken behöver dock anpassas till den höga halten av aska och alkalimetaller [26].



Figur 15. Arbetsmoment i fraktioneringsprocessen som utvecklades på bioraffinaderiet på Bornholm för separering av blad och stjälkar av rörflen [26].

Fraktionering av olika växtdelar kan även leda till signifikant mindre halter av aska och speciellt kisel [25, 98], samtidigt som massautbytet höjs och avvattningsegenskaper förbättras (Finell, 2004). En maskinell fraktionering av rörflenplantor visade att det är möjligt att uppnå samma avvattningstal ($^{\circ}\text{SR}$) för massa av handseparerade fraktioner (Figur 16) [26]. Det krävs dock både ett separeringssteg samt ett sållningsmoment för att uppnå detta resultat. I jämförelse har massa av björk dock fortfarande en något bättre avvattningshastighet.



Figur 16. Avvattningsförmåga (°SR) av rörflensmassa fraktionerat på olika [26].

Totalt är det dock bara 21 % av biomassan som återfanns som massa jämfört med ca 50 % av ofraktionerat rörflen, dock med en lägre kvalitet [98].

Fraktionerna som inte används för produktion av massa kan användas som fastbränsle eller biogassubstrat. För användning som fastbränsle är dock viktiga att beakta den höga halten av aska, speciellt kisel och alkalimetallerna, som kan orsaka problem vid förbränning, t.ex. slaggbildning och askavlagring. Detta kan lösas på olika sätt, t.ex. med en låginblandning i en vedeldad panna eller i pannor speciellt anpassad för mineralrika stråbränslen [99].

13.4 Kiselavskiljning

Jordbruksgrödor och speciellt gräsarter innehåller ofta mycket höga halter av kisel jämfört med vedartade råvaror. Under kokning av biomassan löses kisel ut i luten och kan då skapa problem i kemikalieåtervinning, t.ex. genom beläggning av ytor i värmeväxlare. Under kokningsprocessen kan kisel fällas ur luten genom en pH-ökning till ca 10 som kalciumsilikat. I en kommersiell process kunde ca 80 % av kisel avskiljas [25].

13.5 Svampbehandling

Agrogrödor kan även förbehandlas genom inverkan av en eller flera svamparter som tillhör gruppen av träangripandet svampar. Bland dessa finns arter (t.ex. *Phlebia radiata* Fr., *Phlebia tremellosa*, *Phleurotus ostreatus* Jacq., eller *Ceriporiopsis subvermispora*) som angriper speciellt lignin eller både lignin och cellulosa. I en studie rötades vårskördad rörflensbiomassa med hjälp av *C. subvermispora*. Resultatet blev att ligninhalten minskades med runt 20 %, samtidigt som cellulosahalten ökades med 7 % och massautbytet med 2 % [12]. Processen baseras på att svamparna producerar enzymer (t.ex. lackas) som katalyserar ligninbrytningen. Eftersom dessa svampar bryter även ner parenkymceller effektivt kan halten av finmaterial i massan minskas, vilket borde leda till bättre avvattningsförmåga. Enzymerna som t.ex. lackas kan även isoleras från dess producerande organismer och användas i en direkt process för ligninupplösning.

13.6 Rötning

Det finns skillnader i nedbrytningshastigheten av olika substrat i den mikrobiella nedbrytningsprocessen. T.ex. bryts socker och stärkelse ner mycket snabbt, medan cellulosa

och hemicellulosa bryts ner långsammare. Lignin å andra sidan bryts inte ner alls. Man kan tänka sig en rötningsprocess som förbehandlar fiberråvaran och därmed både omvandlar vissa extraktivämen till energi (biogas) samt påbörjar utlösningssprocessen för fibrerna ur hemicellulosa-lignin-strukturerna. Denna metod är speciellt intressant för grödor som skördas grönt, dvs. med hög vattenhalt. Undersökningar har dock visats att cellulosan kan angripas redan i rötningens första steg, hydrolysen, vilket betyder att utbytet sänks [13].



14 Resultat och slutsatser

Jordbruket kan bidra med ett urval av intressanta grödor till fiber- och energiproduktion. Av flertalet möjligheter finns dock ett begränsat antal grödor som uppfyller kravet på hög avkastning, som anses vara en förutsättning för en lönsam fiberproduktion och en bra konkurrensförmåga till skogens råvaror.

14.1 Odlings- och skördesystem

Odlingsförhållanden för jordbruksgrödor är mycket mer komplex än i skogsbruk, men bjuder också på fler möjligheter att påverka utbytet och kvaliteten av grödan och massan. Alla utvalda grödor odlas idag på mycket begränsade arealer under odlingsförhållanden i norra Sverige. Det bör i fortsättningen av projektet undersökas, vilka arealer kan vara tillgängliga i rimliga avstånd till produktionsanläggningen. Frågan kan också vara om arealer i träda får användas för odling av grödor för fiber- och energiändamål.

De gräsarter rörsvingel, ängssvingel och timotej odlas i viss omfattning i renbestånd till fröproduktion, men huvudsakligen som en del av en vallblandning, dvs. som fodergröda. Det bör undersökas hur t.ex. sortvalet kan bidra till en optimering av fiberutbytet samt förbättring av andra egenskaper såsom vinterhärdighet och mineralhalt. Även samodling av de tre arterna sam rörflen kan tänkas för att säkra stabila årliga skördar [100].

Skördesystemen skiljer sig mellan de fem grödorna i princip i två grupper som är höstskörd och vårskörd. Höstskörd innebär en relativ hög fukthalt och krav på antingen torkning eller ensilering innan det blir möjligt att lagra biomassan. Transport av ensilage är dock förmodligen oekonomisk. Vårskörden innebär minskat fukthalt, minskat andel av bladbiomassa och mindre halter av mineraler.

För varje fibergröda bör det hittas optimala sättet att odla, skörda, förbehandla, transportera och koka råvaran för att optimera fiberutbytet och -kvaliteten. Det finns dock en del frågetecken hur odling, skörd och transport av grödorna kan genomföras ekonomisk (Tabell 19). Fraktionering av biomassan kan vara ett sätt att förbättra fiberråvarans egenskaper (mineralhalt, fiberutbytet, mängden biomassan att transportera), men de flesta fraktioneringsmetoder har ett krav på låg vattenhalt. Det finns dock försök att separera fibrer och vedämnen i grön och fuktig hampa, en teknik som möjligtvis kan användas även i rörsvingel, ängssvingel och timotej. För hampa bör undersökas om höstskörd med vinterfältlagring kan vara möjlig. Det är också klart från Tabell 19 att ingen av de fem grödorna har en självklar, helfungerande logistikkedja och att det finns behov för ytterligare kartläggning.

Tabell 19. Lämpliga hanteringskedjor för nya fibergrödor.

Gröda	Skördetid	Lagring och transport	Problem	Krav/förslag på förbehandlings
Rörflen	Höstskörd + vinterfältlagring	Torra balar, briketter eller pellets	Höga halter av aska, speciell kisel	Fraktionering och kiselavskiljning
Rörsvingel Ängssvingel Timotej	1-2 skördar under sommaren/hösten	Krav på torkning och kompaktering		
	Höstskörd	Krav på torkning och kompaktering		Fraktionering av fiber vid fältkant ^a
Hampa	Vårskörd	Krav på kompaktering	Väderkänslig skörd Inga standard-maskiner tillgängliga	Torrfraktionering av fiber och vedämnen

^a Behöver utvecklas

14.2 Biomassaavkastning

Skördenivåerna som används i denna studie bygger på resultat från publicerade fältförsök. Avkastningsnivåer från fältförsök kan vara missledande, eftersom det inte alltid framgår hur grödorna har skördats. Har den skördats från hand, så är ofta grödorna klippta vid marknivån. Detta leder till en överskattning av biomassaavkastningen eftersom maskinell skörd oftast medför vissa fältförluster (t.ex. stubbar). Fältförsöken utförs oftast även under optimala betingelser, dvs. på bra mark, kanske med extra insatser för att säkra en bra skörd. Detta bidrar ytterligare till en förhöjd skördenivå i fältförsök jämfört med en teknisk möjlig skörd med hjälp av stora skördemaskiner som skulle användas under kommersiella produktionsförhållanden.

Därför bör biomassaavkastningen undersökas under realistiska produktionsförhållanden, på olika marktyper och t.ex. olika gödslingsnivåer.

14.3 Fiberutbytet

Fiberutbytet av de fem grödorna som har valts ut i denna studie har samma eller högre potentiell fiber-, massa-, respektive biomassaavkastning av fibrer som björk. Det är också tydligt, att rörflen har tidigare undersökts mest av de fem grödor vad gäller skörd och logistik, men även massakokning.

Det är dock mycket oklart om hur grödorna beter sig i själva massaprocessen, även rörflen. De flesta litteraturuppgifter rörande massakokning baseras på andra processer än sulfitprocessen. Sulfitmassaprocessen är dessutom unik i förhållande till att luten, som innehåller mest hemicellulosa och lignin kan jäsas till etanol. Dranken kan – efter avdunstning av etanol – torkas och eldas för ytterligare energiproduktion.

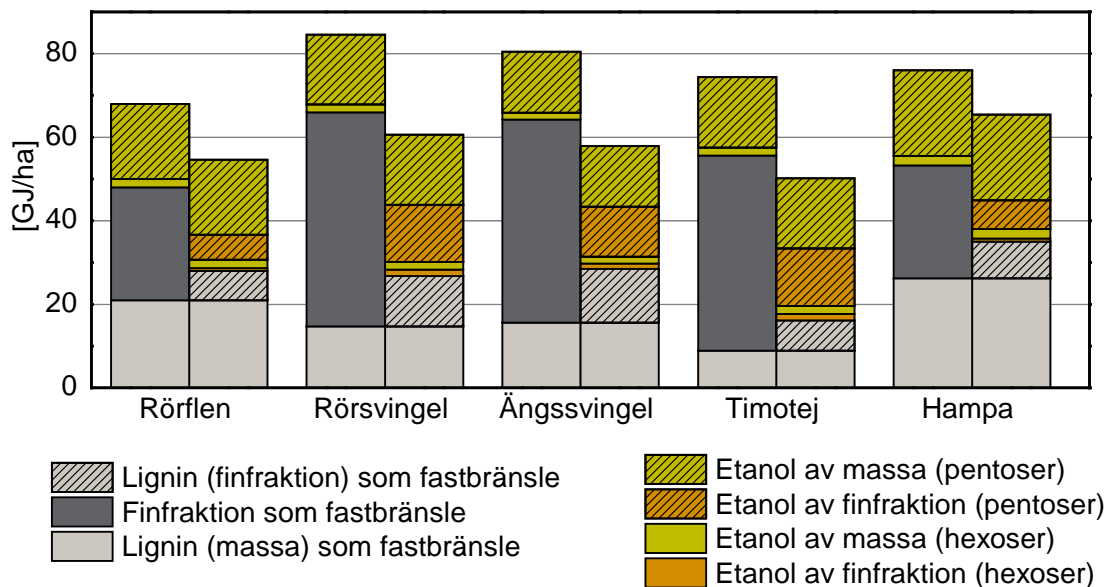
14.4 Energiutvinning

Oavsett skördetidpunkt blir det viktigt att utnyttja båda planternas biprodukterna som antingen jordförbättringsmedel, fastbränsle, eller biogassubstrat och lösta beståndsdelar i luten för att styrka ekonomin av processen. Energiutvinning kan ske på olika sätt beroende på gröda, dess fukthalt och massaprocessen.

Hemicellulosa bryts ner i massaprocessen till monomera socker, som i sin tur kan jäsas till etanol. Med typiska jästkulturer omvandlas vanligtvis bara hexoser, dvs. sockrar med sex kolatomer. Utbytet av etanol kan höjas om jästen har en förmåga att omvandla även pentoser, som är sockrar med fem kolatomer). För att bedöma hur stort etanolutbytet från jäsningsen

efter massprocessen kan vara behövs det undersökas vilka sockrar som återfinns i tvättvätskan, respektive hur hemicellulosa är uppbyggt. Ligninet som avskiljas vid indunstningen av tvättvätskan kan eldas för energiproduktion.

Finfraktionen som uppstår i en eventuell fraktioneringsprocess kan eldas för energiproduktion. Denna fraktion kan dock innehålla höga halter av alkalimetaller och kisel, som kan ställa till problem i förbränningsprocesser, t.ex. genom beläggningar på värmväxlare. Det är tänkbart att använda finfraktionen även som lignocellulosasubstrat i en etanolprocess eller som substrat för biogasproduktion. Eftersom mineraler och lignin finns kvar i biogasprocessens rötrest kan den torkas och eldas eller användas som jordförbättringsmedel.



Figur 17. Potentiellt energiutbyte från de utvalda fiber- och energigrödor, beräknat från litteraturdata [12, 13, 27, 37, 38, 59, 66]. Scenario A i vänster kolumnen visar utbytet när finfraktionen från fraktioneringen och ligninet från massakokningen används som fastbränsle och hemicellulosa i massan jäsas till etanol. Scenario B i höger kolumnen visar utbytet när finfraktionen från fraktioneringen och hemicellulosa jäsas till etanol och ligninet från massakokningen och etanoljäsningen används som fastbränsle. Utbyten har beräknats baserade på två förenklingar: a) sammansättningen (andel cellulosa, hemicellulosa och lignin) är samma i de olika fraktionerna (finfraktion och massafraktion); b) etanolutbyten visar det maximala teoretiska potential för hexoser respektive pentoser, men i praktiken kommer inte hela potentialen att uppnås och pentoserna kan - beroende på jästar som används - möjligtvis bara omsättas i mycket begränsat omfattning. Andelen hexoser i hemicellulosa har antagits ligga på 10 %.

Energiutbyte blir mindre om finfraktionen (blad, noder) jäsas till etanol istället för förbränning (Figur 17). Det erhålls dock ett högvärdigare bränsle, etanol. Användningen av finfraktionen kan bestämmas efter behovet för värme i massprocessen. Rörsvingel, ängssvingel och timotej levererar mer energi per hektar än rörfilen och hampa. Figur 17 bör dock anses vara orienterande pga. stora osäkerheter i data om sammansättningen och teknisk möjliga avkastningar för etanol. Pentoser kan i dagsläget inte anses vara ett substrat i processen, men anpassning av mikroorganismer till pentoser som substrat undersöks.

15 Rekommenderat läsning

Saijonkari-Pahkala, 2001, Doktorsavhandling: Omfattande fältförsök med rörflen, men även andra gräsarter och tvåhjärtbladiga växter. För rörflen gjordes en noggrann genomgång av odlingsfaktorer som kan manipuleras för att uppnå en bättre kvalitet av biomassan för pappersproduktion.

Olsson, 2004: Slutrapport för ett flertal delprojekt kring användning av rörflen för massa- och energiproduktion.

Berggren, 1991: Slutrapport för Projekt Agro-fiber. Här har undersökts ett 20-tal lantbruksväxter för användbarhet som fiberråvara för produktion av pappersmassa.

Finell, 2003, Doktorsavhandling: Omfattande analys av användning av rörflen som råvara till produktion av massa.

Morrison, 1980, artikel: Omfattande analys av kolhydratsammansättning i rörsvingel, ängssvingel och timotej.

16 Tack

Författaren tackar alla inom referensgruppen för diskussioner, förslag på litteratur och kompetent råd, speciellt ska nämnas Mikael Finell (SLU, Umeå), Cecilia Palmberg (SLU, Umeå) och Guido Zacchi (LTH, kemiteknik, Lund). Dessutom tackar författaren Sune Wännström (Sekab), Martin Forsén (Domsjö Fiber), Roland Agnemo (Dominnova), Jan Lindsted (Sekab), Mats Westin (MoRe Research) och David Blomberg (Processum) för att dela med sig erfarenheter om massa- och energiprocesser. Yvonne Söderström tackas för projektledning samt korrekturläsning av manuskripten.



17 Referenser

- [1] Finell M, Xiong S, Olsson R. Multifunktionell industrihampa för norra Sverige. Uppsala, Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences (SLU); 2006. 41 p. BTK Report No 2006:13
- [2] Gustavsson A-M. Jämförelse mellan rödklöver, vitklöver och getärt, In: 7:e regionala lantbrukskonferensen för norra Sverige; 17-18 Mars 1992; Umeå. p. 24-30
- [3] Norgren M, Ericson L. Sortprovning av vallväxter 1992-2001. Umeå: Institutionen för norrländsk jordbruksvetenskap; 2002. 4 p. Nr 3
- [4] Norgren M, Ericson L. Sortprovning 2003 - vallgräs och vallbajlväxter. Umeå: Institutionen för norrländsk jordbruksvetenskap; 2004. 4 p. Nr 2
- [5] Nyman I. Örtväxter på friland - odlingsanvisningar. Vasa: ProAgria Svenska lantbrukssällskapens förbund; 2008. 95 p.
- [6] Ruth P. Sortprovning 2008. Umeå: Institutionen för norrländsk jordbruksvetenskap; 2009. 4 p. Nr 2
- [7] SCB. Normskördar för skördeområden, län och riket 2009. Jönköping, Sweden: Statistics Sweden; 2009. 66 p. Report No JO 15 SM 0901
- [8] Wisur H. Cellsammansättningens inverkan på massa och papper, In: Rörflen för massa och bränsle; 10-11 Nov 1991; Karlstad.
- [9] Wisur H, Sjöberg L-A, Ahlgren P. Selecting a potential Swedish fibre crop: fibres and fines in different crops as an indication of their usefulness in pulp and paper production. *Ind Crops Products*; 1993; 2(1):39-45.
- [10] McDougall GJ, Morrison IM, Stewart D, Weyers JDB, Hillman JR. Plant fibres: Botany, chemistry and processing for industrial use. *J Sci Food Agric*; 1993; 62(1):1-20.
- [11] Moore G. Nonwood fibre applications in papermaking. Surrey, UK: Pira International; 1996. 50 p.
- [12] Saijonkari-Pahkala K. Non-wood plants as raw material for pulp and paper. Jokioinen, Finland: Department of Plant Production Research, MTT Agrifood Research, 2001; doctoral thesis. 101 p.
- [13] Berggren H. Projekt Agro-Fiber. Kristianstad: De Skånska Hushållningssällskapen; 1991. 63 p. Rapport Nr 11
- [14] Domsjö. Processbild. 2012;
<http://www.domsjoe.com/dialog/imagebrowser/imageeditor/getimage.aspx?uidImageGUID=%7bEEAC8F20-1256-4837-81AC-4F2B06990DFD%7d>, accessed 2012-05-22
- [15] Assarsson A, Blomqvist P. Utvecklingsmöjligheter inom Biokombinatet i Alfredshem. Örnsköldsvik: Processum Technology Park; 2005. 24 p. Rapport nr 1
- [16] Christov LP, Akhtar M, Prior BA. The potential of biosulfite pulping in dissolving pulp production. *Enzyme Microb Technol*; 1998; 23(1-2):70-4.
- [17] Durbak I. Dissolving pulp industry - Market trends. Madison, USA: US Department of Agriculture, Forest Service; 1993. 20 p. General Technical Report FPL-GTR-77
- [18] Olsson R. Vårskördad rörflen - konsekvenser för kvaliteten, In: Rörflen för massa och bränsle; 10-11 Nov 1991; Karlstad.
- [19] Lindvall E. Förädling av rörflen som energi- och fiberväxt. 8:e regionala lantbrukskonferensen för norra Sverige. Umeå: SLU, Institutionen för norrländsk jordbruksvetenskap; 1994, p. 1-4.
- [20] Watson AJ, Gartside G. Utilising woody fibre from agricultural crops. *Aust For*; 1976; 39:16-22.
- [21] Jeyasingam JT. A summary of special problems and considerations related to non wood pulping world wide, In: TAPPI Pulping Conference; New Orleans, LA, USA. p. 571-9
- [22] Keitaanniemi O, Virkola N-E. Undesirable elements in causticizing systems. *TAPPI*; 1982; 65(7):89-92.
- [23] Ulmgren P, Lindström R, Saltin G. Kemikalieåtervinning vid framställning av kemisk massa ur ettårsväxter, In: IVA- Symposium: Kan jordbruket bidra till skogsindustrins råvaruförsörjning?; 14.2.1990; Stockholm. Ingenjörsvetenskapsakademien p. 7

- [24] Covey G, Rainey TJ, Shore D. The potential for bagasse pulping in Australia. *Appita Journal*; 2006; 59(1):17-22.
- [25] Finell M. The Use of Reed Canary-Grass (*Phalaris arundinacea*) as a Short Fibre Raw Material for the Pulp and Paper Industry. Umeå: Unit of Biomass Technology and Chemistry, Swedish University of Agricultural Sciences, 2003; Doktorsavhandling. 53 p.
- [26] Olsson R, Finell M, Landström S. Possibilities with new breeding lines of reed canary grass for delayed harvesting and combined pulp and energy production. In: Mela T, Christiansen J, Kontturi M, Pahkala K, Partala A, Sahramaa M, et al., editors. *Alternative crops for sustainable agriculture, Research progress, COST 814*. Turku, Finland: European Commission; 1999, p. 43-52.
- [27] Theander O. Rörflenets kemiska sammansättning, In: Rörflen för massa och bränsle; 10-11 Nov 1991; Karlstad.
- [28] Pahkala KA, Euroola M, Varhimo A. Effect of genotype and growing conditions of fibre and mineral composition of reed canary grass (*Phalaris arundinacea* L.). In: Mela T, Christiansen J, Kontturi M, Pahkala K, Partala A, Sahramaa M, et al., editors. *Alternative crops for sustainable agriculture, Research progress, COST 814*. Turku, Finland: European Commission; 1999, p. 29-42.
- [29] Hultberg A. Industrins krav på nya fiberråvaror, In: Rörflen för massa och bränsle; 10-11 Nov 1991; Karlstad.
- [30] Zacchi G. Institutionen för kemiteknik, Lunds universitet, Lund, Personal communication. 2012-08-09
- [31] Pinto I, Cardoso H, Leão C, van Uden N. High enthalpy and low enthalpy death in *Saccharomyces cerevisiae* induced by acetic acid. *Biotechnol Bioeng*; 1989; 33(10):1350-2.
- [32] Zaldivar J, Nielsen J, Olsson L. Fuel ethanol production from lignocellulose: a challenge for metabolic engineering and process integration. *Appl Microbiol Biotechnol*; 2001; 56(1):17-34.
- [33] Klinke HB, Thomsen AB, Ahring BK. Inhibition of ethanol-producing yeast and bacteria by degradation products produced during pre-treatment of biomass. *Appl Microbiol Biotechnol*; 2004; 66(1):10-26.
- [34] Nilsson D, Bernesson S. Halm som bränsle : Del 1: Tillgångar och skördetidpunkter. Uppsala, Sweden: Department of Energy and Technology, Swedish University of Agricultural Sciences; 2009. 94 p.
- [35] Finell M, Nilsson C. Variations in ash content, pulp yield, and fibre properties of reed canary-grass. *Ind Crops Products*; 2005; 22(2):157-67.
- [36] Morrison IM, Stewart D. Alternative fibre crops grown under Scottish conditions. In: Mela T, Christiansen J, Kontturi M, Pahkala K, Partala A, Sahramaa M, et al., editors. *Alternative crops for sustainable agriculture, Research progress, COST 814*. Turku, Finland: European Commission; 1999, p. 79-85.
- [37] Abdul-Karim LA, Rab A, Polyánszky É, Rusznák I. Optimisation of process variables for production of dissolving pulps from wheat straw and hemp. *Tappi journal*; 1994; 77(6):141-50.
- [38] ECN. Database PHYLLIS - the composition of biomass and waste. Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), 2009. <http://www.ecn.nl/phyllis>, accessed 2012-08-14
- [39] Guay D, Ross N, Rantanen W, Malandri N, Stephens A, Mattingly K, et al. Comparison of Fiber Length Analyzers, In: *Practical Papermaking Conference and Paper Expo*; 23-26 May 2005; Milwaukee, USA. TAPPI
- [40] Pahkala K, Pihala M. Different plant parts as raw material for fuel and pulp production. *Ind Crops Products*; 2000; 11(2-3):119-28.
- [41] Paulrud S, Nilsson C, Öhman M. Reed canary-grass ash composition and its melting behaviour during combustion. *Fuel*; 2001; 80(10):1391-8.
- [42] Magnusson R. Characterization of reed canary-grass as raw material for pulp production by NIR spectroscopy and multivariate calibration. Umeå: Engineering Chemistry, Umeå universitet, 1997.

- [43] Nilsson D. Småskalig uppvärmning med bibränslen. Alnarp, Sweden: Institutionen för lantbruksteknik, Sveriges lantbruksuniversitet; 1992. Reviderad 2012 av Bengtsson, L.
- [44] Pahkala K, Partala A, Suokannas A, Klemola E, Kalliomäki T, Kirkkari A-M, et al. Odling och skörd av rörflen för energiproduktion. Jockis, Finland: Forskningscentralen för jordbruk och livsmedelsekonomi MTT; 2003. 19 p.
- [45] Rolandsson H. Jordbruksverket, Jönköping, Sweden. Personal communication. 2011-08-26
- [46] Eriksson B. Torkning av rörflen, In: Rörflen för massa och bränsle; 10-11 Nov 1991; Karlstad.
- [47] Larsson S, Örberg H, Kalén G, Thyrel M. Rörflen som energigröda. Sveriges Lantbruksuniversitet: Enheten för Biomassateknologi och Kemi, Umeå; 2006. 43 p. 2006:11
- [48] Wennebro T. Bioenergigårdar i ett nytt landskap, Slutrapport, Delprojekt Åker – kustlandMaskinring Norrs odlarutskott; 2011. 17 p.
- [49] Landström S. Sustainability of reed canary grass in cold climate. In: Mela T, Christiansen J, Kontturi M, Pahkala K, Partala A, Sahramaa M, et al., editors. Alternative crops for sustainable agriculture, Research progress, COST 814. Turku, Finland: European Commission; 1999, p. 194-7.
- [50] Wennebro T, Stjärnbäck R. Rapport Delprojekt Åker – kustland, Odlingssäsongen 2010/2011Maskinring Norrs odlarutskott; 2011. 6 p.
- [51] Finell M, Arshadi M, Gref R. Carbohydrate composition in delayed harvested reed canary grass. Biomass Bioenerg; 2011; 35(3):1097-102.
- [52] Sullivan JT, Phillips TG, Routley DG. Grass Hemicelluloses, Water-Soluble Hemicelluloses of Grass Holocellulose. J Agric Food Chem; 1960; 8(2):152-3.
- [53] Andersson B, Lindvall E. Use of biomass from reed canary grass (*Phalaris arundinacea*) as raw material for production of paper pulp and fuel, In: International Grassland Congress; Winnipeg, Canada. IGC p. 3-4
- [54] Paavilainen L, Tulppala J, Finell M, Rehnberg O. Reed canary grass pulp produced on mill scale, In: TAPPI Pulping Conference; Orlando, USA. TAPPI p. 335-41
- [55] SJV. Rörsvingel - odlingsråd vid ekologisk fröodling. Jönköping: Jordbruksverket; 2010. 3 p.
- [56] Olsson M, Olofsson H. Raj- och rörsvingelodling i Sverige. Alnarp: Fakulteten för Landskapsplanering, trädgårds- och jordbruksvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet, 2009. 38 p.
- [57] Hadders G. Fälttorkning av gräs för förbränning - studier genom simulering. Uppsala: Jordbrukstekniska institutet; 1989. 108 p. Rapport 102
- [58] Andersdotter M. Brikettering och torkning av energigräs. Uppsala: Jordbrukstekniska institutet; 1984. 80 p. JTI-rapport 55
- [59] Fowler PA, McLauchlin AR, Hall LM. The Potential Industrial Uses of Forage Grasses Including Miscanthus. Gwynedd, UK: BioComposites Centre, University of Wales; 2003. 40 p.
- [60] Morrison IM. Changes in the lignin and hemicellulose concentrations of ten varieties of temperate grasses with increasing maturity. Grass Forage Sci; 1980; 35:287-93.
- [61] SJV. Ångssvingel - odlingsråd vid ekologisk fröodling. Jönköping: Jordbruksverket; 2010. 3 p.
- [62] Niemeläinen O, Jauhiainen L, Miettinen E. Yield profile of tall fescue (*Festuca arundinacea*) in comparison with meadow fescue (*F. pratensis*) in Finland. Grass Forage Sci; 2001; 56(3):249-58.
- [63] SJV. Timotej - odlingsråd vid ekologisk fröodling. Jönköping: Jordbruksverket; 2010. 3 p.
- [64] Hadders G. Fälttorkning av timotej för fastbränsleeldning. Uppsala, Sweden: Jordbrukstekniska Institutet (JTI); 1984. 22 p. JTI rapport 59
- [65] Collins M. Composition and fibre digestion in morphological components of an alfalfa-timothy sward. Anim Feed Sci Technol; 1988; 19(1-2):135-43.
- [66] Udén P, Van Soest P, J. Comparative digestion of timothy (*Phleum pratense*) fibre by ruminants, equines and rabbits. Br J Nutr; 1982; 47:267-72.

- [67] Bocsa I, Karus M. The Cultivation of Hemp: botany, varieties, cultivation and harvesting. Sebastopol, USA: Hemptech; 1998. 184 p.
- [68] Godwin H. The ancient cultivation of hemp. *Antiquity*; 1967; 41(161):42-9.
- [69] Bradshaw RHW, Coxon P. New fossil evidence for the past cultivation and processing of hemp (*Cannabis sativa* L.) in Eastern England. *New Phytol*; 1981; 89:503-10.
- [70] Ranalli P. Agronomical and Physiological Advances in Hemp Crops. In: Ranalli P, editor. *Advances in Hemp Research*. New York, USA: Food Products Press; 1999, p. 61-84
- [71] van der Werf H. Crop physiology of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.). Wageningen, The Netherlands: Department of Agronomy, Wageningen University, 1994. 153 p.
- [72] van der Werf HMG, van Geel WCA, Wijlhuizen M. Agronomic research on hemp (*Cannabis sativa* L.) in The Netherlands, 1987-1993. *J Int Hemp Assoc*; 1995; 2(1):14-7.
- [73] McPartland JM, Hillig KW. Host-Parasite Relationships in Cannabis. *J Ind Hemp*; 2006; 10(2):85-104.
- [74] Svennerstedt B. Swedish experimental cultivation of industrial hemp, In: *Hemp - Now! Symposium about industrial hemp*; 30.08.2001; Alnarp, Sweden.
- [75] Siritanu V, Siritanu C. Study on monoic hemp lines, obtained at the agricultural research station of Secuieni, Neamt county, concerning the stem, fibre and seed production. *Cercetări Agronomice*; 2009; XLII(1 (137)):31-9.
- [76] Prade T, Svensson S-E, Andersson A, Mattsson JE. Biomass and energy yield of industrial hemp grown for biogas and solid fuel. *Biomass Bioenerg*; 2011; 35(7):3040-9.
- [77] Prade T. *Industrial Hemp (Cannabis sativa L.) – a High-Yielding Energy Crop*. Alnarp, Sweden: Department of Agrosystems, Swedish University of Agricultural Sciences, 2011; Doctoral thesis. 93 p.
- [78] Sundberg M, Westlin H. *Hampa som bränsleråvara*. Uppsala, Sweden: JTI Institutet för jordbruks- och miljöteknik; 2005. 32 p. JTI Report Lantbruk & Industri 341
- [79] Pasila A. The dry-line method in bast fibre production. Helsinki, Finland: Department of Agricultural Engineering and Household Technology, University of Helsinki, 2004. 66 p.
- [80] Hobson RN, Hepworth DG, Bruce DM. PH—Postharvest Technology: Quality of Fibre Separated from Unretted Hemp Stems by Decortication. *J Agric Eng Res*; 2001; 78(2):153-8.
- [81] Svensson S-E, Prade T, Hallefält F, Mattsson JE. *Utvädning av metoder för vårskörd av stråbränslen*. Alnarp, Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Department of Agriculture - Farming system, Technology and Product Quality; 2010. 32 p.
- [82] Sankari H. *Towards bast fibre production in Finland - Stem and fibre yields and mechanical fibre properties of selected fibre hemp and linseed genotypes*. Jokioinen: Plant Production Research - Crops and Soil, Agricultural Research Centre of Finland, 2000; Dissertation. 70 p.
- [83] Wong A, Chiu C. Pulping and bleaching of hemp (*Cannabis sativa*), In: *Tappi Pulping Conference*; October, 1995; Chicago, USA. p. 471-6
- [84] Correia F, Roy DN. Analysis of Hemp Chemical Pulp Monosaccharide Degradation Compared with Aspen and Spruce Chemical Pulps. *Journal of Natural Fibers*; 2005; 2(1):35-58.
- [85] Lavoie J-M, Beauchet R, Berberi V, Chornet M. Biorefining Lignocellulosic Biomass via the Feedstock Impregnation Rapid and Sequential Steam Treatment. In: Bernardes MADS, editor. *Biofuel's Engineering Process Technology*. InTech; 2011, p. 685-714
- [86] Marques G, Rencoret J, Gutiérrez A, del Río J. Evaluation of the Chemical Composition of Different Non-Woody Plant Fibers Used for Pulp and Paper Manufacturing. *The Open Agriculture Journal*; 2010; 3:1-9.
- [87] Kirby RH. *Vegetable fibres : botany,cultivation,and utilization*. London: L.Hill;Interscience; 1963.

- [88] Finell M, Nilsson C, Olsson R, Agnemo R, Svensson S. Briquetting of fractionated reed canary-grass for pulp production. *Ind Crops Products*; 2002; 16(3):185-92.
- [89] Wilén C, Moilanen A, Kurkela E. Biomass feedstock analyses. Espoo, Finland: VTT Technical Research Centre of Finland; 1996. 39 p.
- [90] Finell M, Burvall J, Olsson R. Perennial rhizomatous grass - Evaluation of techniques for improving transport economy for industrial use of RCG, reed canary grass. In: El Bassam N, Behl PK, Prochnow B, editors. *Sustainable Agriculture for Food, Energy and Industry*. London: Routledge; 1998, p. 919-21
- [91] Burvall J, Örberg H. Brikettering av rörflen - teknik och ekonomi. Umeå, Sweden: Institutionen för norrlänsk jordbruksvetenskap, Sveriges lantbruksuniversitet; 1994. 17 p. Rapport 10:1994
- [92] Örberg H. Brikettering av rörflen med kolvpress. Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå: Enheten för biomassateknologi och kemi, BTK 2011. 9 p.
- [93] Örberg H. Brikettering av rörflen med mobil skruvpress. Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå: Enheten för biomassateknologi och kemi, BTK 2011. 8 p.
- [94] Paulrud S, Lundmark B. Förstudie-mobil briketteringsanläggning för rörflen i norrlands inland. Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut; 2009. 28 p. 2009:19
- [95] Olsson R, Landström S, Nilsson C, Schade J, Löfqvist B, Paavilainen L, et al. Final report of the project Reed Canary Grass (*Phalaris arundinacea*) - Development of a new crop production system based on delayed harvesting and a system for its combined processing to chemical pulp and bio fuel powder. Umeå, Sweden: Enheten för biomassateknologi och kemi (BTK), Sveriges lantbruksuniversitet; 2004. 133 p. BTK rapport vol. 7
- [96] Björn Petersen P. Fractionation of straw from annual plants, In: Rörflen för massa och bränsle; 10-11 Nov 1991; Karlstad.
- [97] Pedersen SM, Gylling M. Economics of the combined reed canary grass production chain for cellulose chips and biofuel - based on north European conditions. In: Mela T, Christiansen J, Kontturi M, Pahkala K, Partala A, Sahramaa M, et al., editors. *Alternative crops for sustainable agriculture, Research progress, COST 814*. Turku, Finland: European Commission; 1999, p. 233-42.
- [98] Finell M, Nilsson C. Kraft and soda-AQ pulping of dry fractionated reed canary grass. *Ind Crops Products*; 2004; 19(2):155-65.
- [99] Prade T, Finell M, Svensson S-E, Mattsson JE. Effect of harvest date on combustion related fuel properties of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.). *Fuel*; 2012; 102:592-604.
- [100] Palmborg C, Scherer-Lorenzen M, Jumpponen A, Carlsson G, Huss-Danell K, Högberg P. Inorganic soil nitrogen under grassland plant communities of different species composition and diversity. *Oikos*; 2005; 110(2):271-82.

