

EFFEKTIV TRANSPORT AV BIOENERGI FÖR KRAFTVÄRMEPRODUKTION

RAPPORT 2015:143



BRÄNSLEBASERAD EL- OCH
VÄRMEPRODUKTION



Effektiv transport av bioenergi för kraftvärmeproduktion

JENNIE RODIN, MARCUS JANSSON, MOA BERGLUND

ISBN 978-91-7673-143-7 | © 2015 ENERGIFORSK

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

FÖRORD

Denna rapport är slutrapportering av projekt SYS 38740 Effektiv transport av bioenergi för kraftvärmeproduktion (Energimyndighetens projektnummer P 38740) som faller under teknikområde systemteknik inom SEBRA, samverkansprogrammet för bränslebaserad el- och värmeproduktion.

Projektets huvudsyfte har varit att visa på möjligheterna att minska energianvändningen och öka resurseffektiviteten på systembasis vid förädling, transport och slutanvändning av biobränslen för el- och värmeproduktion och svarar därmed mot frågeställningen tryggad bränsleförsörjning inom teknikområde systemteknik.

Projektet har följts av en referensgrupp bestående av Ylva Sundlöf (Grontmij) Torbjörn Harrysson (Stora Enso Nymölla) och Klas Simes (Holmen).

SEBRA, samverkansprogrammet för bränslebaserad el- och värmeproduktion, är efterföljaren till Värmeforsks Basprogram och startade som ett samarbetsprogram mellan Värmeforsk och Energimyndigheten 2013. All forskningsverksamhet som bedrevs inom Värmeforsk ingår sedan den 1 januari 2015 i Energiforsk. Därför ges denna rapport ut som en Energiforskrapport.

Programmets övergripande mål är att bidra till långsiktig utveckling av effektiva miljövänliga energisystemlösningar. Syftet är att medverka till framtagning av flexibla bränslebaserade anläggningar som kan anpassas till framtida behov och krav. Programmet är indelat i fyra teknikområden: anläggnings- och förbränningsteknik, processtyrning, material- och kemiteknik samt systemteknik.

Stockholm juni 2015

Helena Sellerholm

Områdesansvarig

Bränslebaserad el- och värmeproduktion, Energiforsk AB

Abstract

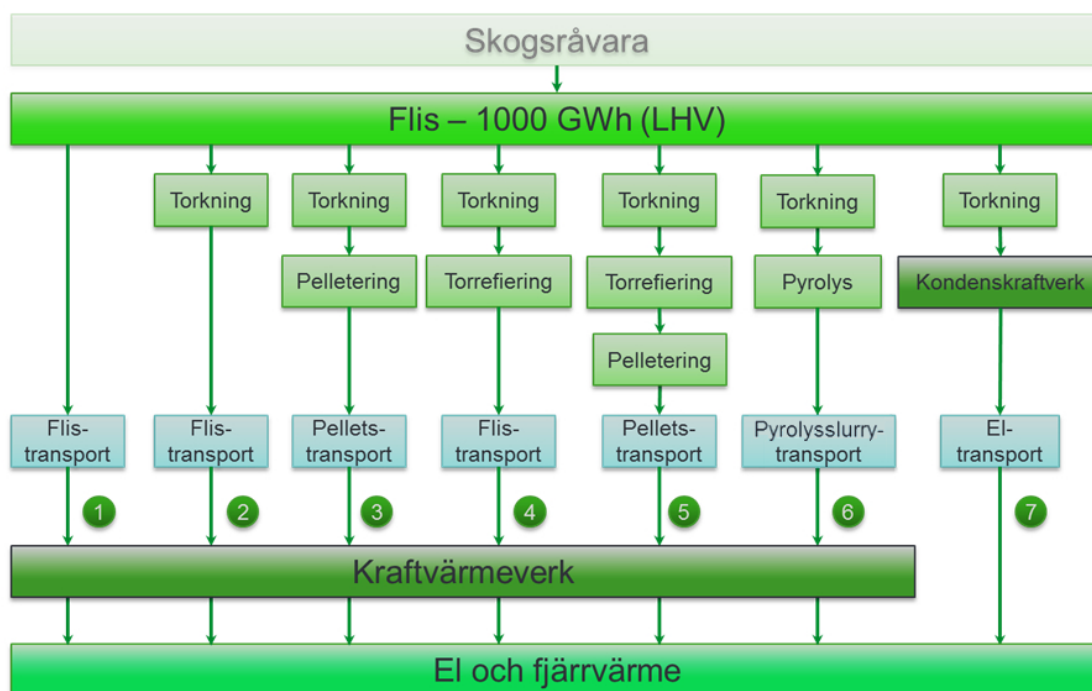
Resultaten av studien visar att all form av förädling leder till minskat el- och värmeutbyte i jämförelse med att inte förädla biobränslet innan transport; det lägre utbytet vägs inte upp av en motsvarande minskning i transportenergiförbrukning. Värme- och elproduktion genom förbränning av fuktig flis ger den högsta totalverkningsgraden på systembasis. Det är ekonomiskt lönsamt ur transportsynpunkt att förädla biobränsle innan långväga transport.

Sammanfattning

I Sverige återfinns en stor del av vår skogsråvara i norr medan flest användare finns i söder. Biomassan (ofta fuktig flis) måste därmed transporteras långa sträckor för att nå sin slutanvändare. Ur transportsynpunkt är det fördelaktigt med ett biobränsle som har så hög energidensitet som möjligt. Utredningen syftar till att undersöka det energimässiga och transportekonomiska värdet av att förädla skogsråvara innan längre transporter, med slutanvändning för kraftvärmeproduktion. Projektet har genomförts i form av en fiktiv fallstudie bestående av sju olika fall med olika typer av förädlingsprocesser;

1. Fuktig flis
2. Torkad flis
3. Vit pellets
4. Torrefierad flis
5. Svart (torrefierad) pellets
6. Pyrolyspanprodukter
7. El i kondenskraftverk

Skogsråvaran förädlas i norra Sverige, transporteras med tåg till en omlastningsterminal i Mälardalen och därefter via lastbil till ett kraftvärmeverk anpassat för bränslet för att producera el och värme. Fallstudien visualiseras övergripande i Figur I.



Figur I. Illustration som schematiskt visar upplägget på fallstudien; 1 – Fuktig flis, 2 – Torkad flis, 3 – Vit pellets, 4 – Torrefierad flis, 5 – Svart pellets, 6 – Pyrolys, 7 – El i kondenskraftverk

Studien visar att det inte lönar sig att förädla biobränsle enbart baserat på att transporten blir effektivare då energiförlusten vid förädling är större än den minskade energiförbrukningen vid transport av förädlad biobränsle. Studien visar dock att det är ekonomiskt lönsamt ur transportsynpunkt att förädla biobränsle innan långväga transport. Dessutom minskar antalet tågomlopp för bränsleförsörjning vilket kan minska belastningen på järnvägssystemet.

Om hög totalverkningsgrad är målet ska biobränslet inte förädlas, högst sammanlagd värme- och elproduktion på systembasis på givet bränsleunderlag ges genom förbränning av fuktig flis. Om endast el beaktas är det mest gynnsamt att producera el i kondenskraftverk i norr, all annan förädling leder till minskat el- och värmeutbyte i jämförelse med att inte förädla biobränslet innan transport. Däremot minskar transportkostnaderna vid all sorts förädling och är som lägst för pyrolys och elproduktion i kondenskraftverk. Vilken förädlingsform som är mest lämplig beror på vilken energiform som efterfrågas samt vilka typer av transport- och förbränningsförutsättningar som föreligger.

Som komplement till rapporten finns en enkel beräkningsapplikation i Excel-format med möjlighet för läsaren att utföra anpassade beräkningar.

Rapportens resultat och den kompletterande beräkningsapplikationen kan användas som underlag till strategiska beslut av intressenter inom skogsnäringen, kraftvärmebranschen och övriga branscher som pappers- och massaindustrin.

Executive Summary

Background

Sweden has set up the target to have a sustainable and resource effective energy supply without net emissions of greenhouse gases to the atmosphere by 2050. This requires, among other things, that resources are used efficiently. A limited supply of raw material provides a high competition for biomass available which also makes it important to use the available raw materials efficiently. Furthermore, CHP producers ask for flexibility in their fuel supply to reduce the risks which means that some biofuel is shipped longer distances than just from the absolute vicinity. This increases the demand on the infrastructure and the biofuel itself.

In Sweden there are large amounts of forest resources in the north while most users are situated in the south. The biomass (often wood chips) must therefore be shipped long distances to reach their end users. It is therefore of interest to investigate whether processing of forest residues can result in lower shipment costs and lower overall power consumption, and at the same time map how much energy that is lost in the refining process.

Target and purpose

The study aims to investigate, from both an energy perspective and a transport economy perspective, in what form bioenergy should be transported for the best resource efficiency; in primary form or processed form by for example torrefaction or pyrolysis.

The result will highlight the opportunities for making better use of forest resources, which could be used for strategic decisions within the energy sector regarding long distance shipping of biofuels.

Intended audience for the project is primarily stakeholders transporting bioenergy; forestry, heat and power industry and other industries as pulp and paper industry.

Conditions

The study is based on a fictional¹ case study consisting of seven different cases with different types of processing operations;

¹ The study is fictional in the sense that it is not based on existing plants and transport chains. Though, the calculations made are based on data from existing plants and relevant literature.

1. Wood chips
2. Dried wood chips
3. White pellets
4. Torrefied wood chips
5. Black (torrefied) pellets
6. Pyrolysis
7. Electricity in condensing power plant

The arrangement of the case study is as follows. All cases start with 1 000 GWh of forest residues in the form of undried wood chips, geographically placed in the north of Sweden. The forest residues are first processed in a processing plant in the north and are then shipped south by train to a transshipment terminal in Mälardalen. From there the refined forest residues are transported by truck to a nearby CHP plant, optimised for the fuel, to produce electricity and heat. Case 1 is a reference case without any processing; undried wood chips are shipped in its original form. Case 7 differs from the other cases; instead of shipment of forest residues, electricity is produced in the north which is then transferred by cable to the south.

The conditions for each case are optimised based on the biofuel, e.g. if the biofuel has a high enough percentage of moisture the CHP in the south has got flue gas condensation equipment to maximise the extraction of thermal energy from the biofuel. The logistics is optimised for each biofuel based on the type, weight and volume.

Common to all cases is that all actions only get their energy from the forest residues in one way or another, illustrated in Figure II. The fossil energy used for transportation from north to south is reported separately as a supply of external energy (diesel). The electricity used within the system, for both processing and transportation, is taken from the electricity production within the system.

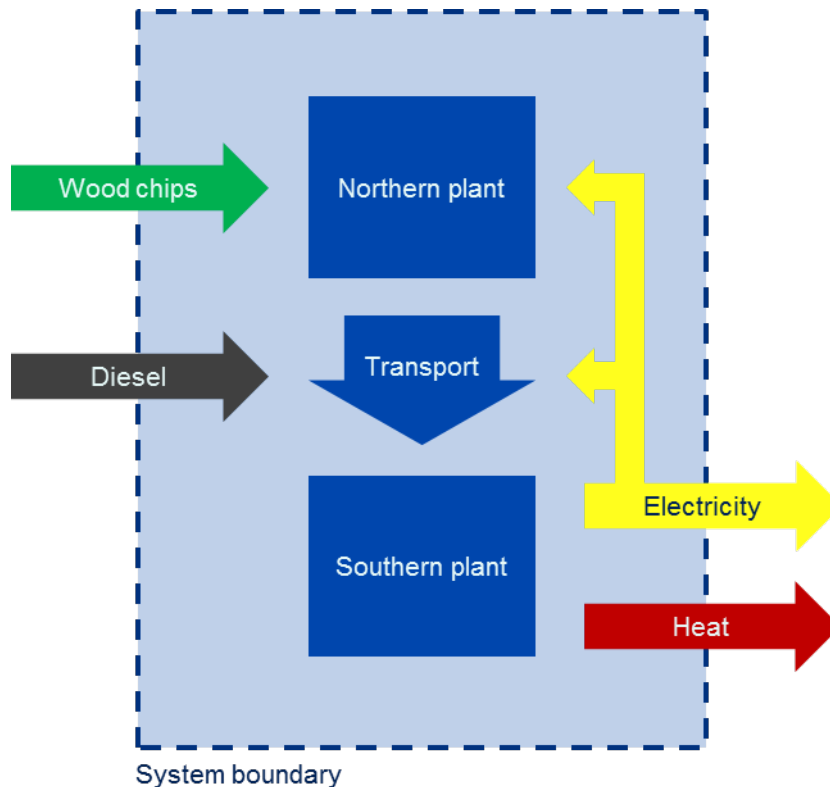


Figure 11. Illustration showing the flows of energy in the system

Delimitations

The case study of the project is fictitious, no actual measurements on existing systems has been carried out within the project. Though, the calculations made are based on data from existing plants together with experience values from previous projects and data from relevant literature.

In order to limit the work; time and storage aspects are not included in the study. The majority of the energy losses are assumed to occur during processing and transport.

No account has been taken of the varying demand for heat over the year; both processing and transportation are expected to be evenly distributed over the year. In practice, this means that the plants are assumed to represent the base load in their respective district heating systems.

Results

The result of the fictitious case study is based on optimal conditions with constant flow of biofuel over the year, optimised refinement and combustion processes for each biofuel and it does not include aspects of storage. Therefore, the result should primarily be compared within the study and not directly with reality. The study only covers transportation costs; production costs for processing and storage are not included.

Processing leads to reduced electricity and heat exchange

The resulting amount of net electricity and heat for the system is presented for each case in Figure III. In general, the net amount of electricity does not differ significantly between the cases; however the difference achieved is greater regarding the heat. Most electricity from the system is available in case 7 with 330 GWh, though without any heat. Highest total efficiency and the largest heat production are obtained in case 1 at 106 % and 770 GWh respectively, mainly due to flue gas condensation and high moisture content of the fuel.

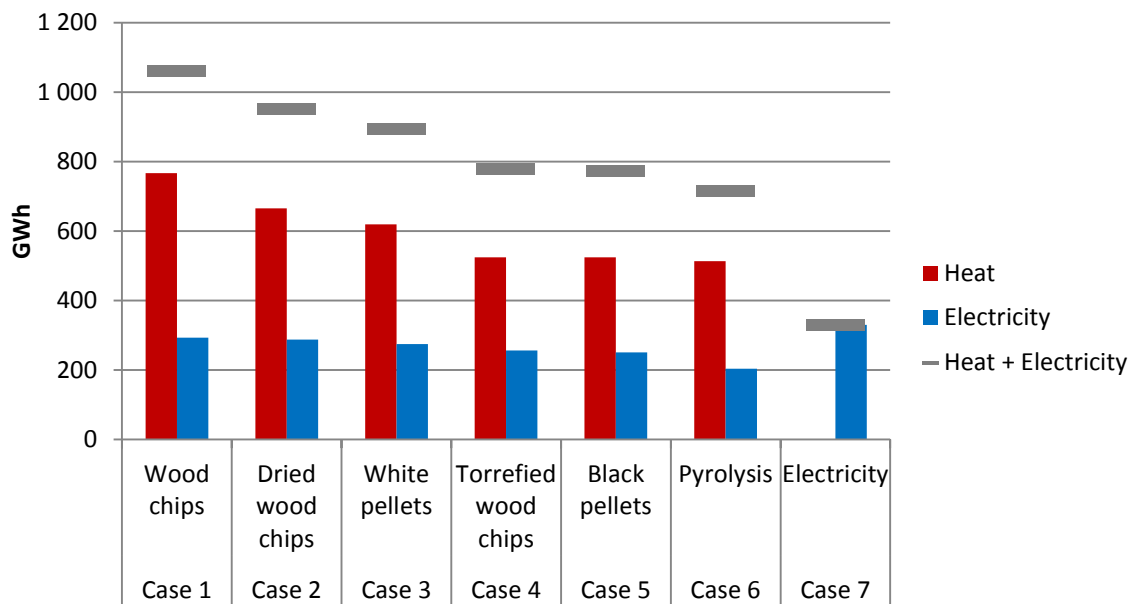


Figure III. The resulting amount of net electricity and heat for the system

The results of the calculations show that, from an energy point of view, it is not meaningful to refine the undried wood chips before the transportation; the total electricity and heat exchange in the system decreases with increased degree of processing.

It is only if maximum exchange of electricity is of interest that it, from an energy point of view, is worth processing the undried chips; through electricity production in a condensing power plant and transportation of electricity by cable (case 7). The reason why is because a condensing power plant is optimised for pure electricity production which leads to a higher electrical efficiency (36 %) compared to a CHP (31 %) that at the same time produces heat.

Processing can reduce energy consumption in transport

It is found (Figure IV) that it is energy consuming to transport water; the lower the moisture contents in the biofuel, the lower the energy consumption during transport. The total energy consumption for transportation of torrefied wood chips is less than half the energy consumption for transport of undried wood chips. The largest energy consumption

occurs during transport of electricity in the form of grid losses, in the study estimated to 7,4 %.

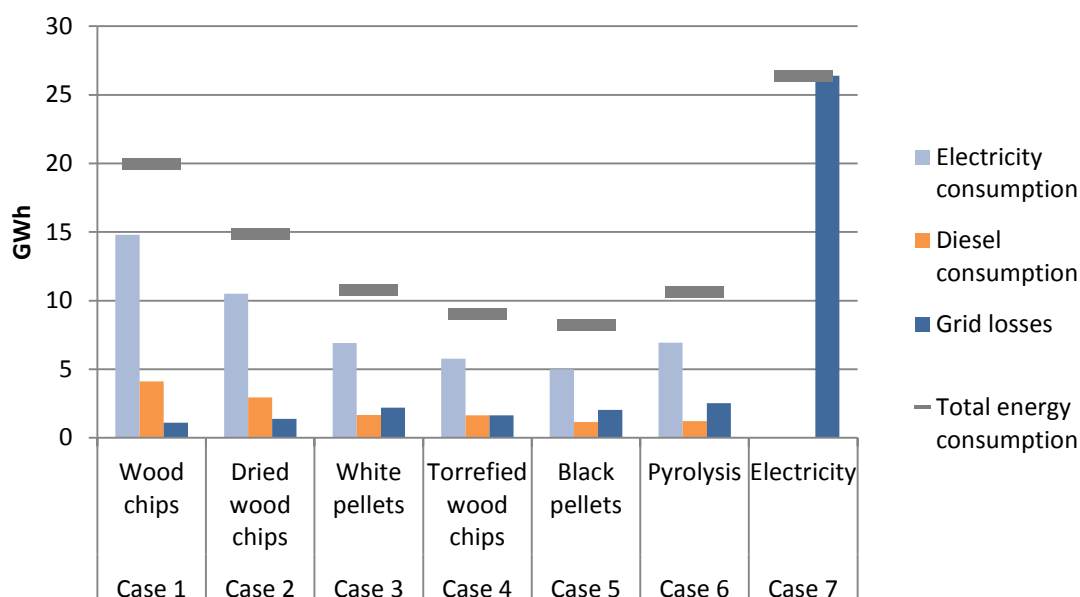


Figure IV. Consumption of electricity and diesel, together with grid losses, during transport

From a transport point of view it is beneficial with a biofuel that has a high energy density; more bioenergy can then be shipped per weight or volume. However, in some cases the weight is limiting the shipment and in some cases the volume.

Pelletizing of dried wood chips to white pellets reduces the energy consumption for transportation by almost 30 %; mainly due to lower moisture content in the pellets together with a higher density. Pelletizing of torrefied wood chips to black pellets only reduces the energy consumption by barely 10 % since the weight is constant due to unchanged moisture content in the pelletizing process.

The largest share of the energy consumption during transport consists of electricity consumption, related to the long distance train transportation. The magnitude of the consumption depends on the amount of trains needed per year to transport the biofuel, and the amount of trains depends on the total weight that is being transported. The total weight of undried wood chips to be transported in case 1 is more than 414 000 tonnes, the total weight of torrefied wood chips in case 4 is only 143 000 tonnes; this leads to around 460 and 150 trains a year respectively for the two cases. In case 6 the electricity consumption is higher due to the need of warming of the pyrolysis slurry during transport.

Observe that storage aspects are not included in the study, so any energy consumption for ventilation, warming etc. during potential storage are not included in the results.

Transport costs decrease with increased processing

As seen in Figure V, the transport costs decrease with increased degree of processing. The main reason for this (for case 1 – 5) is that the amount of biofuel to be transported is decreased with increased degree of processing. The transport procedure is identical for case 1 – 5 which means quantity and density are the only parameters determining the cost. The transportation costs for pyrolysis slurry (case 6) are the lowest among case 1 – 6 that involves transportation of biofuel, in spite of the fact that the weight is greater in case 6 than in for instance case 4 - 5. This is because in case 6 the biofuel is a pumpable fluid which leads to lower costs for e.g. loading and reloading. The whole cost structure for case 6 differ from the other cases due to the liquid form as it demands different equipment and handling procedures. In case 7 the transportation costs are represented by the cost of transporting electricity in the grid, obviously the lowest cost in the study.

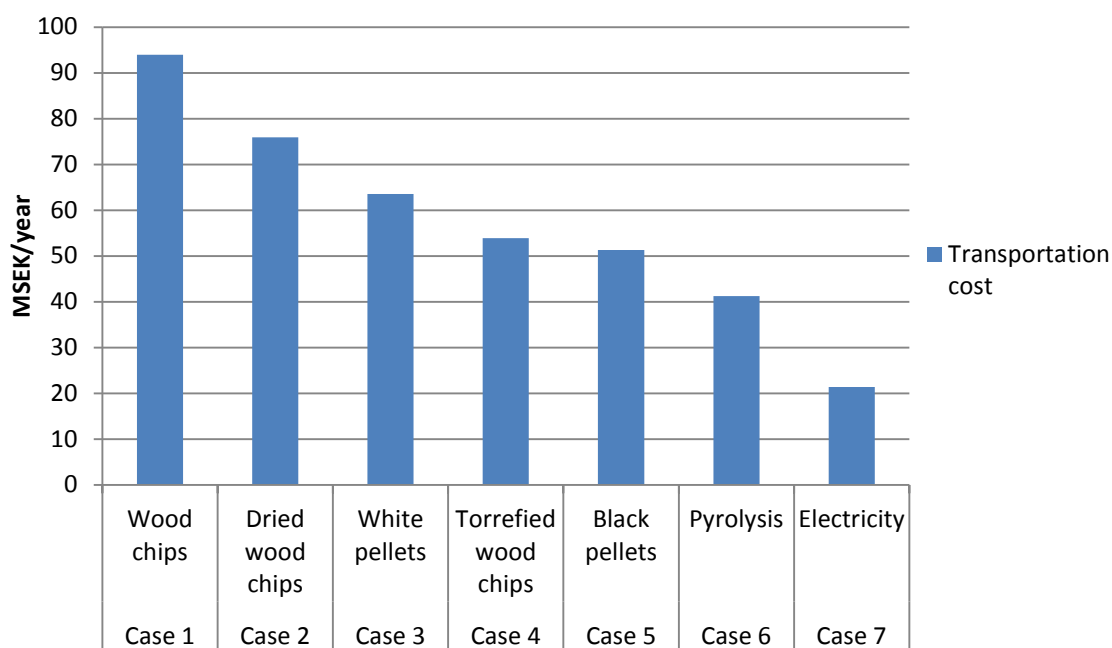


Figure V. The resulting transportation costs.

In case 1 – 5 the largest part of the transportation costs relates to the long distance rail transport. The number of trains needed per year to transport all biofuel is the parameter affecting the total costs the most, which in turn depends on the weight and volume of the biofuel that is to be transported. For instance, the trains have a maximum total weight which limits the amount of biofuel that can be transported; especially in case 3 and case 5 where the density is very high, then the carriages can't even be filled due to the weight limit. Sometimes, for the more voluminous biofuels, the volume instead limits the amount of biofuel that can be transported.

The costs related to loading and reloading of trains and trucks varies less between the cases compared to the transportation costs for rail transport, except for case 6 where pyrolysis slurry is transported which is pumpable and consequently associated with substantial lower costs.

The transportation costs related to truck transport consists of a very small part of the total costs in all cases, even though the cost per kilometre is very high; more than 10 times higher than the cost per kilometre for rail transport.

Once again, the storage aspects are not included in the study. These may be considerably significant, especially for case 6 due to rent of cisterns and appurtenant warming.

The lowest transportation cost per unit of energy depends on the requested form of energy

What case in the case study that leads to the lowest transportation cost per unit of energy depends on the requested form of energy. If only electricity is of interest; Case 7 is by far the cheapest way to transport bioenergy, though without any heat production. The cost of transporting electricity is calculated to 65 SEK/MWh, including grid losses. This can be compared to Case 1 in Figure VI where the transportation cost per unit electricity is calculated to 320 SEK/MWh_{el}, although heat is produced too.

For other forms of energy (biofuel and heat) pyrolysis in Case 6 leads to the lowest transportation cost per unit of energy, followed by black pellets and torrefied wood chips, see Figure VI and Figure VII. The transportation cost per unit transported pyrolysis slurry is calculated to 48 SEK/MWh. The relative transportation costs decreases with increased degree of refinement, but with a decreasing rate.

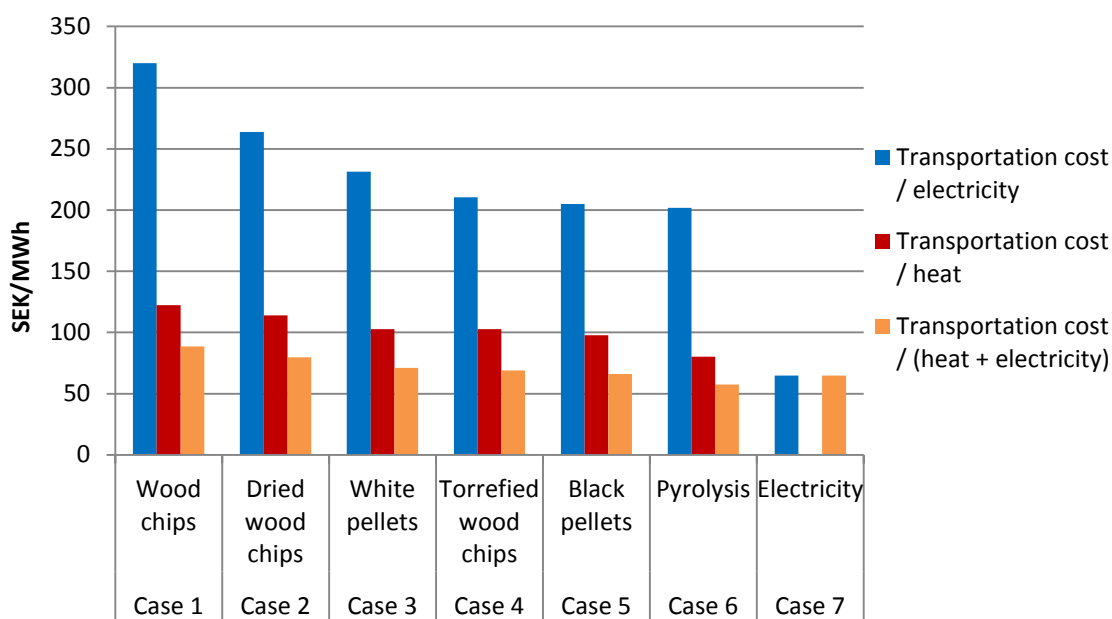


Figure VI. Transportation costs relative to produced net electricity and heat

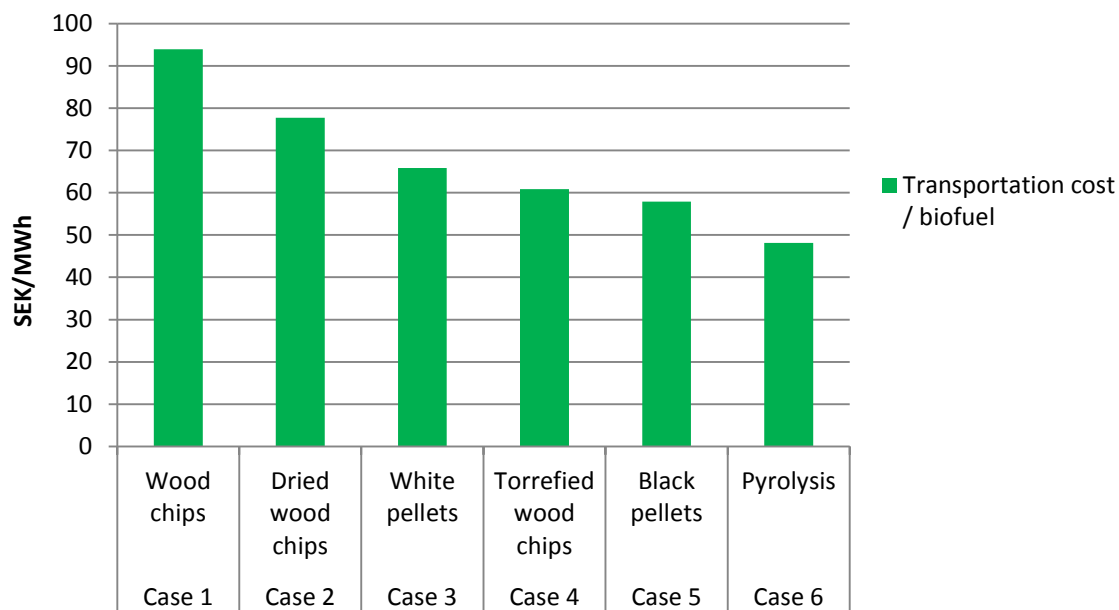


Figure VII. Transportation costs relative to transported biofuel

It should be noted that the transportation of pyrolysis slurry (Case 6) is associated with the greatest uncertainties in the study as very few long-distance transportations of pyrolysis slurry exist. Though, the results of the study are supported by Benjaminsson et.al. [1].

Conclusion

The study shows, from an energy point of view, that it is only profitable to produce electricity in condensing power plants and transport the electricity in cables; all other forms of processing in the study leads to reduced net production of electricity and heat in comparison to not refining the biofuel before shipment. In contrast, processing leads to reduced shipment costs for all kinds of processing in the study. The lowest shipment cost is associated with pyrolysis or electricity production in condensing power plants depending on the energy form of interest together with prevailing transport and combustion conditions.

Calculation application

As a complement to this report a simple calculation application in Excel format has been developed, with the ability to perform minor custom calculations. Input data to the calculations in the report and the calculation application is presented in the appendix.

Recommendation and usage of the report

The report's findings and the additional calculation application can be used as a basis for strategic decisions of stakeholders interested in upgrading and long distance shipment of bioenergy.

The results of the study show that it is economically viable, from a transportation point of view, to refine biofuels before long distance transport. Costs are reduced by 15-20 % by simply drying the wood chips before transport (from 50 % moisture content to 30 % moisture content).

If the goal is to maximise the resource utilisation, no processing of biofuels should take place before long distance biofuel shipments. Refinement leads to greater energy loss in the system in relation to the reduction of energy consumption in transport as processing aims to. The only exception is when only electricity is of interest; then electricity production in a condensing power plant and transportation of electricity by cable can be worth from a resource point of view.

Further studies

The study does not cover the cost of processing or storage of biomass, it only includes transportation costs. A suggestion for further studies is to complement the study with an analysis of all other expenses in the system and to calculate the overall most economically advantageous refinement method, storage and transportation of bioenergy.

The case study is simplified so that the CHP plants have a uniform supply of biofuel over the year. This is true for some plants with a uniform demand of heat as base load in the district heating system but most plants have a varied heat load during the operating season, generally between September/October to April/May. A suggestion for further studies is to perform the study for the most interesting refinement methods but with a classic duration diagram that varies over the year.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING.....	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	BESKRIVNING AV FORSKNINGSSOMRÅDET	1
1.3	BEHOV AV NY FORSKNING.....	2
1.4	FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSSOMRÅDET	2
1.5	MÅL OCH MÅLGRUPP	3
1.6	PROJEKTAVGRÄNSNINGAR.....	3
2	TEKNISK BAKGRUND	4
2.1	KRAFTVÄRMEPRODUKTION	4
2.2	TORKNING	6
2.3	PELLETSPRODUKTION.....	8
2.4	TORREFIERING	8
2.5	PYROLYS	9
3	TRANSPORT AV BIOENERGI I SVERIGE.....	12
3.1	FAST BULKGODS	12
3.2	FLYTANDE BULKGODS.....	14
4	FALLSTUDIE.....	15
4.1	ÖVERGRIPANDE BESKRIVNING AV FALLSTUDIEN	15
4.2	BERÄKNINGSFÖRUTSÄTTNINGAR	21
4.3	FALL 1 – FUKTIG FLIS.....	22
4.4	FALL 2 – TORKAD FLIS	24
4.5	FALL 3 – VIT PELLETS.....	25
4.6	FALL 4 – TORREFIERAD FLIS	27
4.7	FALL 5 – SVART PELLETS	29
4.8	FALL 6 – PYROLYSPRODUKTER	30
4.9	FALL 7 – EL I KONDENSKRAFTVERK.....	32
5	RESULTATREDOVISNING.....	35
5.1	ENERGI	35
5.2	TRANSPORTEKONOMI	38
5.3	TRANSPORTKOSTNADER RELATIVT TRANSPORTERAD OCH PRODUCERAD ENERGI.....	40
6	RESULTATANALYS	43
6.1	FÖRÄDLING LEDER TILL MINSKAT EL- OCH VÄRMEUTBYTE.....	43
6.2	FÖRÄDLING REDUCERAR ENERGIFÖRBRUKNINGEN VID TRANSPORT	43
6.3	LÅNGA TRANSPORTSTRÄCKOR KRÄVS FÖR ATT UPPVÄGA FÖRÄDLINGSFÖRLUSTER	44
6.4	TRANSPORTKOSTNADERNA MINSKAR MED ÖKAD FÖRÄDLINGSGRAD	45
6.5	LÄGST TRANSPORTKOSTNADER PER ENERGIENHET BEROR PÅ EFTERFRÅGAD ENERGIFORM.....	47
6.6	FARTYGSTRANSPORT ÄR BILLIGARE MEN MER ENERGIKRÄVANDE	48
6.7	MINSKADE TRANSPORTKOSTNADER GER ÖKAT INVESTERINGSUTRYMME	50
6.8	FÖRÄDLING LEDER TILL MINSKAD BELASTNING PÅ JÄRNVÄGSNÄTET	51
7	SLUTSATSER	53
8	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	54
9	FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSSARBETE.....	55
10	LITTERATURFÖRTECKNING	56

Bilagor

A INDATA TILL FÖRÄDLINGSBERÄKNINGAR

B INDATA TILL TRANSPORTBERÄKNINGAR

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Sverige har som mål att år 2050 ha en hållbar och resurseffektiv energiförsörjning utan nettoutsläpp av växthusgaser i atmosfären. Ett koldioxidneutralt Sverige kräver därmed att resurser används på ett optimalt sätt. Ett begränsat råvaruutbud ger en hög konkurrens om tillgänglig biomassa och det är därför viktigt att använda de tillgängliga råvarorna effektivt. Kraft- och värmeproducenter eftersträvar dessutom flexibilitet i sin bränsleförsörjning vilket ofta innebär att en del bränsle transporteras längre sträckor än bara från den absoluta närheten. Det ställer ökade krav på infrastrukturen och logistiken, men också på biobränslet i sig.

I Sverige återfinns en stor del av vår skogsråvara i norr medan flest användare finns i söder. Biomassan (ofta fuktig flis) måste därmed transporteras långa sträckor för att nå sin slutanvändare. Förädling av skogsråvaran medför (med stor sannolikhet) lägre kostnad och energiförbrukning för transporten men samtidigt försvinner energi i förädlingsprocessen.

Ur transportsynpunkt är det fördelaktigt med ett biobränsle som har så hög energidensitet som möjligt, mer bioenergi kan då transporteras per vikt- eller volymenhet. Det finns flertalet förädlingsmetoder som ökar energidensiteten hos biobränslen, exempelvis pyrolys och torrefiering som skulle kunna effektivisera bränsletransporten men i och med att förädlingen innefattar energiförluster är det inte självklart huruvida det är värt att förädla bränslet innan transport eller ej.

WSP har i detta projekt undersökt om transport av bioenergi bör göras i förädlad eller oförädlad form med hjälp av en omfattande fallstudie där förädlingstekniker som torkning, pelletering, torrefiering och pyrolys jämförts med varandra. Ett fall med kondensdrift och eltransport ingår i jämförelsen. Eventuell problematik kring bränsletransport och logistik i Sverige diskuteras.

1.2 Beskrivning av forskningsområdet

Förädling och transport av bioenergi har utretts i ett flertal rapporter, både inom ramen för Värmeforsk och av andra institutioner. Ett urval av dessa rapporter presenteras nedan.

Frosch och Thorén [2] beskriver ur ett tekniskt och ekonomiskt perspektiv hur järnvägstransport av biobränslen till svenska kraftvärmeverk ska kunna öka. Rapporten belyser vikten av att ha ett ändamålsanpassat transportupplägg med terminaler och hanteringsförfaranden anpassade till det biobränsle som fraktas.

Miljöpåverkan och energiförbrukning utreds av Forsberg [3] för olika transportkedjor av bioenergi genom en fallstudie med start i Sverige och mål i Holland. Studien är koncentrerad till endast elproduktion och ser värme som en förlust. De olika formerna av biobränsle som ingår i studien är obehandlad biomassa, balad flis, pellets och elektricitet via elnätet.

En liknande studie har gjorts för endast torrefierad biomassa av Svanberg et al. [4] som med hjälp av en tekno-ekonomisk systemmodell analyserat hur logistik- och produktionsparametrar påverkar logistikkedjan av torrefierad biomassa för svenska förhållanden. Modellen innehåller fyra delmodeller; (1) försörjningssystem, (2) mass- och energibalans av torkning, torrefiering och komprimering, (3) ekonomi och (4) distributionssystem till slutanvändare.

Befintliga och framtida marknader för långväga transport av träpellets, torrefierat trä och pyrolysolja har utretts av IEA [5]. Bränslekaraktistik, marknaders mognadsgrad och framtida tillgång till råvara diskuteras i ett globalt perspektiv med fokus på geografiskt ursprung, transport och ekonomi. Logistikkostnadens inverkan på totala transportkostnaden undersöks.

Benjaminsson et al. [1] har studerat hur pyrolysolja kan få en roll i det svenska energisystemet. Produktion, distribution och konsumtion av pyrolysolja undersöks utifrån tekniska, ekonomiska och miljömässiga aspekter.

1.3 Behov av ny forskning

Till skillnad från tidigare studier innefattar detta projekt flertalet förädlingsmetoder av olika mognadsgrad i samma studie och jämför dem med varandra ur ett energi- och transportekonomiperspektiv för svenska förhållanden. Anläggningen som förädlar bränslet får ett större fokus vilket är av stor vikt eftersom en stor del av energin i det ursprungliga bibränslet kan försvinna i processen. Nämnade tidigare studier har olika fokusområden och inget av dem har ett brett fokus avseende både förädlingstekniker och energi, men fungerar som stöd i detta projekt.

1.4 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet

Projektet bygger på en omfattande fiktiv fallstudie med sju olika fall där förädlingsprocesserna torkning, pelletering, torrefiering, pyrolys och elproduktion i kondenskraftverk jämförs med varandra. Utgångspunkten för fallstudien är att 1 000 GWh_{LHV} fuktig flis i norra Sverige förädlas, transporteras och omvandlas till el och fjärrvärme i södra Sverige. Respektive bibränsle transporteras enligt bestämda transportalternativ med tåg och lastbil utifrån bibränsletyp, vikt och volym. Fokus för projektet är att kartlägga alla energiförluster i de ingående processerna och transporterna. Resultatet av projektet kommer för olika förädlingsprocesser att svara på frågan – *hur mycket el och fjärrvärme kan produceras av det återstående energiinnehållet samt hur mycket energi har förbrukats vid förädling, transport och omvandling?*

Projektet syftar till att visa på möjligheterna att minska energianvändningen på systembasis vid förädling, transport och slutanvändning av bibränslen för el- och värmeproduktion. Projektet kan ge förutsättning för ett mer resurseffektivt utnyttjande av naturresurser genom att kedjan från skog till slutanvändning för kraftvärmeproduktion effektiviseras och den använda primärenergien ur ett systemperspektiv minskar. Ett förbättrat resursutnyttjande kan leda till lägre energikostnader vilket stärker biokraftvärmens roll i energisystemet.

1.5 Mål och målgrupp

Målet med projektet är att ur ett energiperspektiv undersöka i vilken form bioenergi transporteras för bästa resurseffektivitet; i primärform eller i förädlad form genom exempelvis torrefiering eller pyrolys.

Resultatet kommer att belysa möjligheterna att bättre utnyttja vår skogsråvara, vilket kan ligga till grund för strategiska beslut inom energiområdet. En effektiv transportform av biobränsle kan komma att förbättra bränslelogistiken och avlasta flaskhalsar i transportsystemet.

Tänkt målgrupp för projektet är i första hand intressenter som transporterar bioenergi; skogsnäringen, kraftvärmebranschen och övriga branscher som pappers- och massaindustrin.

1.6 Projektavgränsningar

Fallstudien i projektet är fiktiv. Beräkningarna baseras däremot på data från verkliga anläggningar i den mån sådan finns, tillsammans med erfarenhetsvärden och data från relevant litteratur.

För att begränsa arbetet behandlas inte tids- och lagringsaspekter i studien utan detta beskrivs endast kvalitativt. Majoriteten av energiförlusterna antas uppstå vid förädling och transport.

Ingen hänsyn tas till varierande värmeunderlag över året, både förädling och transporter beräknas ske jämnt fördelat över året. I praktiken innebär detta att de anläggningar som innefattas antas utgöra baslasten i sina respektive fjärrvärmesystem.

2 Teknisk bakgrund

Följande kapitel tar upp de tekniker för uppgradering av bioenergi i form av skogsflis som återfinns i fallstudierna i kapitel 3. De indata som används vid beräkningarna presenteras under respektive avsnitt. Dessutom ges en introduktion till bioenergitransport i Sverige.

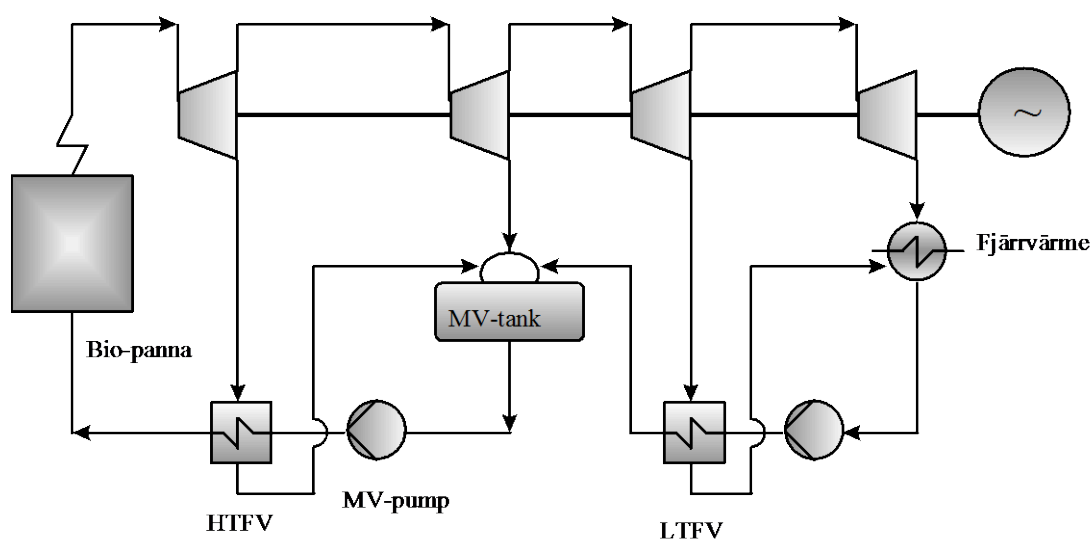
2.1 Kraftvärmeproduktion

Formuleringar kring kraftvärmeproduktion är till viss del hämtade från ett tidigare arbete utfört av författarna, Elforskrapport 14:40: El från nya och framtida anläggningar 2014 [6].

Ett biobränsleeldat kraftvärmeverk är i regel baserat på en Rankine-cykel och har syftet att producera både el och värme. Biobränsle tillförs och eldas i en eldstad. De varma rökgaser som bildas värmer i sin tur upp vatten som förångas. Ångan expanderar i en ångturbין med generator, vilken genererar elektrisk ström. Efter att ångan har expanderat i ångturbinen kondenseras den i en kondensor, vilket ger fjärrvärme.

2.1.1 Kraftverksteknik

Figur 1 visar ett exempel på ett processschema för ett kraftvärmeverk. En ångcykel kan, som i figuren, ha flera olika högtrycksförvärmare (HTFV), lågtrycksförvärmare (LTFV) och kondensordelar. För större anläggningar kan även mellanöverhetning vara tekniskt/ekonomiskt lönsamt.



Figur 1. Exempel på ett processchema för ett kraftvärmeverk

Figure 1. Example of a process scheme for a CHP plant

Det är temperaturnivån i kondensorn som bestämmer sluttrycket för ångans expansion och den är därför en viktig parameter för hur mycket mekaniskt arbete som kan tas ut per kilo ånga. Vid en kraftvärmeapplikation nyttiggörs värmets i kondensorn för fjärrvärmeproduktion. Temperaturen på det utgående kylvattnet, framlednings-temperaturen, behöver då vara cirka 70-120°C beroende på årstid och fjärrvärmesystem.

För att öka den termiska verkningsgraden i ett kraftvärmeverk används värmeväxlare internt i processen, bland annat i form av förvärmare där matarvattnet värms med avtappningsånga från ångturbinen till lämplig temperatur före pannan. Mellanöverhettning är också termodynamiskt gynnsamt vilket innebär att ångan först expanderar till ett visst tryck i en ångturbin, därefter överhettas den åter i pannan för att ännu en gång expandera i en ångturbin. Mellanöverhettningen höjer medeltemperaturen för det värme som tillförs ångcykeln och innebär även att ångtrycket kan höjas kraftigt utan att problem med höga fukthalter erhålls i ångturbinens sista steg.

Den verkliga cykelkonfigurationen och omfattningen intern värmeväxling i ett kraftvärmeverk bestäms av en teknisk/ekonomisk optimering. Generellt gäller att större anläggningar får en mer avancerad ångcykel och därmed högre termisk verkningsgrad.

2.1.2 Pannor

Större pannor för biobränsle i form av flis är idag ofta av typen BFB (Bubblande Fluidiserad Bädd) eller CFB (Cirkulerande Fluidiserad Bädd). Bäddmaterialet består huvudsakligen av sand som fluidiseras med hjälp av inblåst förbränningsluft. I fallet CFB är lufthastigheten så stor att bädden kommer i cirkulation. Bäddmaterialet och eventuellt oförbrända partiklar avskiljs från rökgasen i cyklonen och återförs till eldstadens nedre del. Även större pannor för förbränning av pulveriserade och flytande biobränslen förekommer i Sverige i mindre utsträckning men är mer vanliga på kontinenten.

Pannan innehåller interna värmeväxlare som luftförvärmare, ekonomiser, förångare och överhettare. Utläggningen av dessa värmeväxlare utmed pannans stråk kan variera i det enskilda fallet.

2.1.3 Rökgaskondensering

Rökgaskondensering är med dagens fjärrvärmepriser lönsamt för fuktiga biobränslen och med kondenseringen kan totalverkningsgraden öka väsentligt. Totalverkningsgraden baseras generellt på bränslets lägre värmevärde och beror på fukthalten på biobränslet och på fjärrvärmevattnets returtemperatur. Vid 45 % fukthalt på biobränslet och en antagen returtemperatur för fjärrvärmen på 50°C kan totalverkningsgraden bli cirka 105 %. Används dessutom uppfuktning och förvärmning av förbränningsluften kan totalverkningsgraden ökas till cirka 113 %. Den extra energin tas från rökgasen i form av sensibelt och latent värme vilket innebär att rökgasens tillstånd efter rökgaskondensering och före skorsten är cirka 35°C med fukthalten 5 %. Rökgaskondensering innebär att alfavärdet (förhållandet mellan eleffekten och fjärrvärmeeffekten) minskar och därmed minskar elproduktionen för ett givet värmebehov

2.1.4 Kondenskraft

Kondenskraft bygger på samma kraftverksteknik som kraftvärme, skillnaden är att elproduktionen är det centrala och värme istället hanteras som en förlust. Ångcykeln optimeras därför till att maximera elproduktionen, värmen kyls bort i kyltorn eller växlas

mot exempelvis en sjö. Driftdata för en kondenskraftsanläggning skiljer sig följaktligen från en kraftvärmeanläggning.

2.2 Torkning

Formuleringar kring torkning är till viss del hämtade från ett tidigare arbete utfört av författarna, Värmeforskrapport 1150: Förgasning för bränsleproduktion i stor- och småskaliga energikombinat [7].

Torkning är ett sätt att höja det effektiva energiinnehållet hos ett bränsle före förbränning och är en förutsättning för flera av de fall som studeras. Enligt grundläggande förbränningskunskap måste fukten avlägsnas från ett trämaterial innan förbränningsprocessen med frigörande av bränslets energi påbörjas. Träbränslet måste därför genomgå ett torkningsförlopp vid all form av förbränning.

En viktig skillnad är om bränslet torkas innan det når förbränningsrummet eller om fukten drivs av med redan brinnande bränsle inne i eldstaden. I det senare fallet kommer fukten i form av vattenånga att följa med rökgaserna och en betydande energimängd som härrör från vattnets ångbildningsvärme kommer gå till spillo om inte ångan kondenseras i en efterföljande rökgaskondensering.

Genom att torka bränslet *innan* det tillförs eldstaden erhålls primärt två fördelar:

- Den teoretiskt tillgängliga energin i bränslet utnyttjas bättre.
- Avgasförlusten i samband med förbränning av bränslet minskar.

2.2.1 Påverkan på panna

Ett torrare bränsle innebär förändrade betingelser i pannan i form av ökad förbränningstemperatur och minskad rökgasvolym. Detta kan påverka pannan så att den blir effektivare och får en högre kapacitet. Det är visserligen möjligt att tillgodogöra sig en del av den förångningsförlust som uppstår vid avdunstning av fukt i bränslet om det finns behov för lågtemperaturvärme, exempelvis fjärrvärme, som kan utvinnas genom rökgaskondensering. I en kraftvärmeprocess konkurrerar dock rökgaskondensering med elproduktion i vissa fall genom att den minskar värmeunderlaget för elproduktion.

Med en bränsletork, som drivs med lågtempererad värme, är det däremot möjligt att omvandla energi från en sekunda energikälla till prima energi, vilket visas av Berntsson et al [8].

2.2.2 Generella förutsättningar för torkning

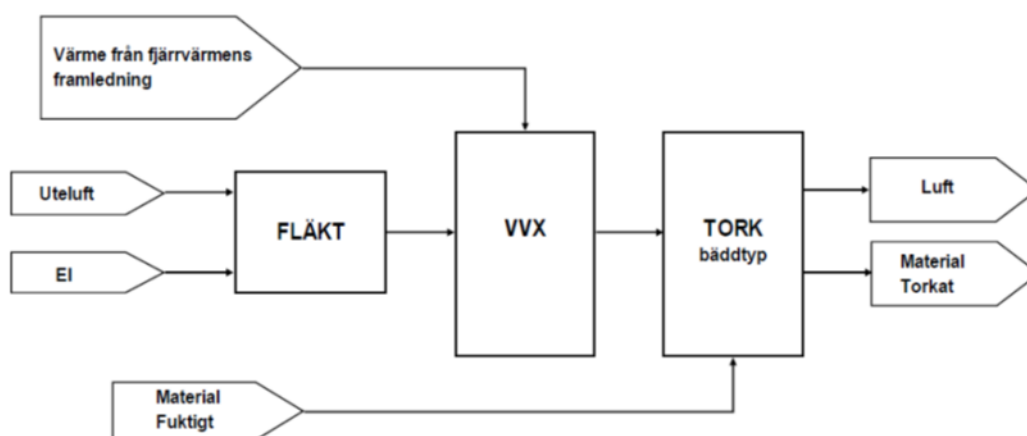
Torkning av biobränsle kan utföras på ett flertal olika sätt. Torkgodsets beskaffenhet och tillgång till värmekälla bidrar till beslutet om vilken torkteknik som lämpar sig bäst för en given tillämpning.

För att nå bästa möjliga ekonomi i torkningen är det naturligtvis önskvärt att kunna utnyttja en billig värmekälla för värmning av torkmedium.

2.2.3 Bäddtorkning

Nedanstående avsnitt beskriver bäddtorkning vilket är en teknik där lågtempererad värme kan användas. För ytterligare information om torkteknik rekommenderas Värmeforskrapport 881 [9] och Värmeforskrapport 1151 [8].

Bäddtorkning innebär, precis som namnet antyder, att bränslet torkas på en bädd. I den vanligaste varianten av bäddtorkar förs torkgodset fram på ett perforerat transportband, varvid torkmediet blåses igenom bädden antingen uppifrån eller nerifrån. Vid bäddtorkning används vanligen luft som torkmedium. Ett system för bäddtorkning kan vara uppbyggt enligt processchema nedan.



Figur 2. Processchema för bäddtork

Figure 2. Process scheme for a bed dryer

Bäddtorkning är en teknik som visat sig vara passande vid tillämpningar där det finns möjlighet att utnyttja värmekällor av låg temperatur för värmning av torkmedium. Detta gör att den är speciellt användbar vid tillämpningar som kraftvärmeverk och massabruk, där fjärrvärme respektive spillvärme från ett massabruks processer kan användas som värmekälla. Bäddtorken har dessutom en relativt låg elförbrukning. De elförbrukande enheterna vid själva bäddtorken är främst:

- Fläkt för transport av torkmedium
- Skruv för fördelning av gods på bädd
- Frammatning av gods på bädd
- Eventuell skimmerskruv (skruv som föser av övre lagret av bädden)

Bäddtorken ställer normalt inte några speciella krav på förbehandling av bränsle före torkning. Detta gör bäddtorkning till en lämplig metod, framför allt i de fall där det finns en befintlig panna som kan elda det torkade bränslet.

Den specifika värmeförbrukningen för en bäddtork är cirka 4 MJ tillfört värmeväxlaren per kg avdunstad fukt och varierar med differens mellan torkmediets temperatur före och efter värmning. Den specifika luftförbrukningen för en bäddtork varierar mellan ca 30

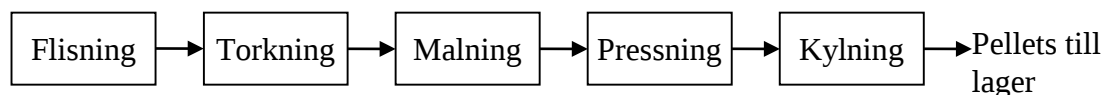
och 90 m³ fuktig luft/kg avdunstad fukt, främst beroende på önskad temperatur på luft till bäddtorken, men även beroende av utomhusluftens temperatur och relativa fuktighet.

2.3 Pelletsproduktion

Formuleringar kring pelletsproduktion är till viss del hämtade från ett tidigare arbete utfört av författarna, Värmeforskrappport 1150: Förgasning för bränsleproduktion i stor- och småskaliga energikombinat [7].

Råvaran till pellets, trä, måste flisas och malas till lämplig storlek. Det vanligaste sättet att mala är att använda hammarkvarn. Innan hammarkvarnen torkas flisen till en fukthalt på 10-15 %. Denna fukthalt krävs för att pelleteringsprocessen ska fungera optimalt. När sågspånet lämnar torken mals det till ett grovt pulver med en kornstorlek på maximalt 3 mm. Efter det omvandlas pulvret till pellets med en diameter på ca 8 mm i en eller flera pelletspressar. Ofta tillsätts en fraktion ånga för att efter pelleteringen uppnå optimal fukthalt om detta inte kan garanteras av torken. Pelletsen kyls sedan med luft i en värmeväxlare, för att förbättra pelletsens stabilitet. [10]

Ett blockschema för pelletsproduktion presenteras i figur 3.



Figur 3. Blockschema för pelletsproduktion

Figure 3. Block flow diagram for pellet production

2.4 Torrefiering

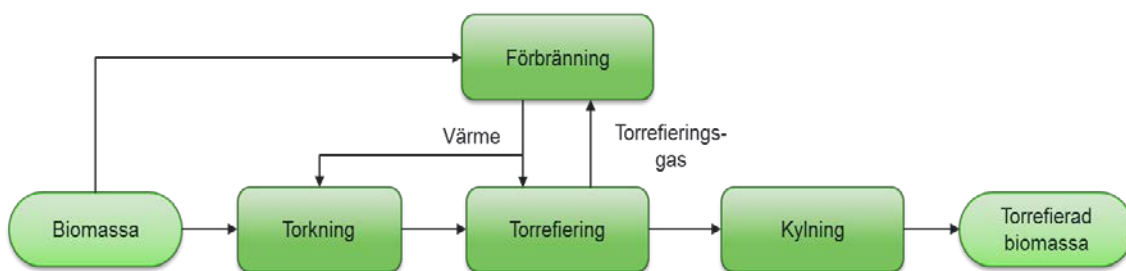
Ekbom beskriver i [11] att torrefiering (rostning) är en termo-kemisk process som torkar och bryter ned strukturer i biomassa till en produkt med kraftigt förändrade fysikaliska egenskaper. Produkten har hög energidensitet, är vattenavvisande, har lång hållbarhet samt är lättare att mala för det fall produkten ska pelleteras eller eldas i pulverbrännare.

Torrefiering är en exoterm process som sker vid temperaturer mellan 200-320 °C och i en atmosfär utan syre och vatten, vilket förhindrar antändning och oxidation. Under processen avgår vatten och flyktiga ämnen i den omfattningen att vikten respektive energiinnehållet reduceras med storleksordningen 20-30 % respektive ca 10 %, vilket typiskt ger en energidensitet mellan 18-24 MJ/kg. Med högre temperaturer och längre uppehållstider ökar energiförlusten till gas. [11] [12]

För att upprätta en bra torrefiering torkas biomassan först i en tork för att få ned fukthalten till 10 %. Efter torrefiering har fukthalten i biomassan sjunkit till 0-6 %, beroende på torrefieringsförhållanden. [13] [12] Ur en viktsandel torr biomassa (10 % fukthalt) erhålls ca 2/3 torrefierad flis, resten blir torrefieringsgas. [12]

Torrefierat biobränsle lämpar sig väl att malas till pulver och pelleteras. Som pellets erhålls ca 65 % högre energidensitet än vanliga (vita) träpellets och 150 % högre energidensitet än träflis. Dessutom är malningsegenskaperna avsevärt bättre efter torrefiering, elförbrukningen reduceras generellt till mindre än en fjärdedel för att nå en viss storleksfraktion. Samtidigt ökar även kvarnens kapacitet med mer än tre gånger. Ett utökat användningsområde med torrefierat och pulveriserat biobränsle är att det med fördel kan användas i pulvereldade kolpannor. [11]

Det som skiljer olika torrefieringstekniker, förutom reaktortypen, är hur värmen återförs till processen vid en integrering. Figur 4 visar en schematisk skiss över en torrefieringsprocess som först torkar biomassan i en tork och sedan torrefierar biomassan i en torrefieringsreaktor. Restgaser från torrefieringen återförs till processen.



Figur 4. Schematisk skiss över en torrefieringsprocess

Figure 4. Schematic outline of a torrefaction process

2.5 Pyrolysis

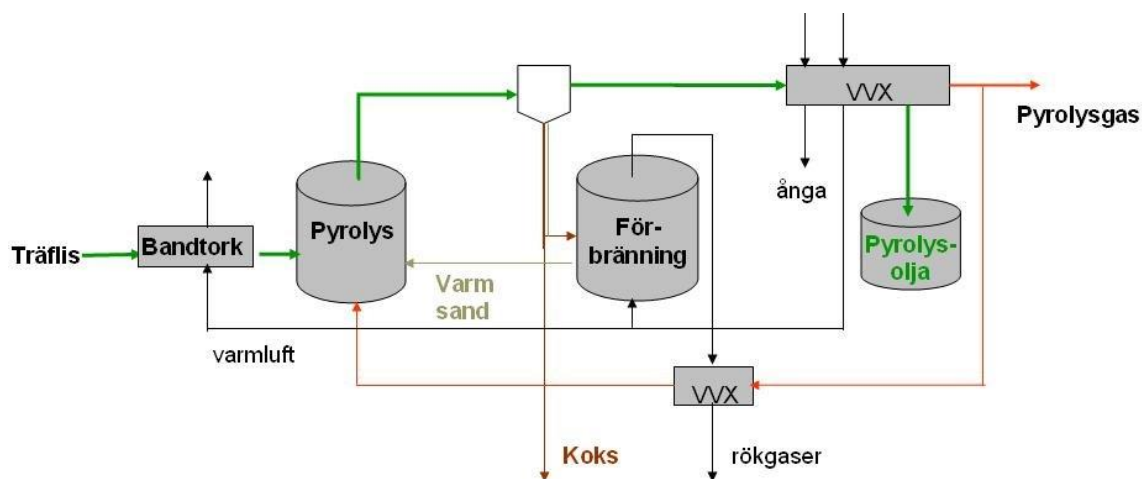
Rodin beskriver pyrolysisprocessen i en rapport från 2008 [14]. Formuleringar kring pyrolysis är till viss del hämtade från rapporten.

Pyrolysis innebär att bränslet med hjälp av värme konverteras till organiska ångor (tjäror), gas och koks. Ångorna kyls och kondenseras, vilket ger en vätska som ofta benämns som pyrolysolja. Gasen kan, efter borttagning av koldioxid, användas som bränsle. Även den bildade koksen kan, och brukar, användas på detta sätt. Av pyrolysisprodukterna uppgår pyrolysolja till ca 75 vikts-%, gas till 13 vikts-% och koks till 12 vikts-%, beroende på bränsle och reaktortemperatur. [14]

Pyrolysis sker vid relativt låga temperaturer, typiskt runt 500°C, och i de flesta fall utan syre. Dessa förhållanden favoriserar bildandet av organiska ångor. Vid pyrolysis och förgasning är det viktigt med en snabb värmeöverföring från värmebärande medium till biomassan som ska konverteras. Därför är det av stor vikt att storleken på biomassapartiklarna är tillräckligt liten. I litteraturen hittas ofta en maximal storlek på partiklarna på 1 mm-3 mm angivna. För användning i en pyrolysanläggning krävs också att biomassan torkas till <10 % fukthalt innan pyrolysis.

En pyrolysanläggningen består i princip av en pyrolysisreaktor samt ett eller flera kondensationssteg för att kondensera ut de organiska ångorna och vattnet, schematiskt

illustrerat i Figur 5. Värmetillförseln till pyrolysreaktorn kan ske via sand som värmts genom förbränning av pyrolyskoks och pyrolysgas i en intilliggande ugn. Kondensationen av gas och ångor sker i värmeväxlare och kondensorer. Det är möjligt att göra det i flera steg, som i Figur 5 där både ånga och varmluft produceras. Den mängd varmluft som krävs för torkning av träflis kan utan problem produceras. Värmen i rökgaserna från koksugnen kan användas till att förvärma den delvis recirkulerade pyrolysgasen som kan användas som fluidiseringsgas i pyrolysreaktorn. Beroende på upplägg kan gasen också förbrännas i sin helhet.



Figur 5. Schematisk skiss över en pyrolysanläggning, exempel

Figure 5. Schematic outline of a pyrolysis installation, as an example

2.5.1 Pyrolysolja

Vätskan som fås då pyrolysångorna kondenserats är inte egentligen en olja förutom till namnet. Det är en blandning av hundratals olika ämnen, bland annat vatten, pyrolytiskt lignin, aldehyder, karboxylsyror och karbohydrater.

Pyrolysolja är en relativt lättflytande mörkbrun till svart vätska med rökaktig doft. Den är delvis vattenlöslig, helt löslig i polära lösningsmedel som exempelvis metanol, och helt olöslig i olja. Eftersom pyrolysoljan är en intermediär produkt från pyrolysen får den vid förvaring inte utsättas för värme över 80°C. Över denna temperatur fortsätter ämnena i pyrolysoljan att reagera och polymerisering sker. Detta sker till viss del även vid lägre temperaturer, vilket leder till att pyrolysoljans viskositet långsamt ökar med tiden. En viskositetsökning leder bland annat till en försämring av ämnets pumpbarhet.

2.5.2 Pyrolysgas

Gasen som bildas vid pyrolys av biomassa består till stor del av kolmonoxid, koldioxid och vätgas, med en mindre mängd metan, etan och tyngre kolväten. Obehandlad har gasen ett värmevärde på knappt 12 MJ/Nm³ om inte luft (kväve) tillsatts någonstans i ledet. Värmevärdet kan ökas genom att gasen renas från koldioxid.

2.5.3 Koks

Vid pyrolys bildas förutom pyrolysolja och gaser även en fast fas, koks, bestående av till stor del oförbränt kol. Det kalorimetriska värmevärdet varierar något beroende bland annat på vilken temperatur pyrolysen sker vid, men är i snitt ca 30 MJ/kg torr askfri koks.

Koksen katalyserar sönderdelandet av de genom pyrolysen bildade organiska ångorna till lättare fraktioner och är därför önskad i pyrolyskammaren, varför en snabb separation från gaser och ångor är önskvärd. Den koks som bildas används ofta som bränsle för att driva pyrolysen.

2.5.4 Pyrolysslurry

För att driva pyrolysisprocessen kan delar av de genererade pyrolysisprodukterna användas och normalt är det gas och koks som används för detta ändamål. Dock krävs inte all gas och koks för detta. Det är generellt enklare att transportera fast bränsle än gasformigt och därmed erhålls pyrolyskoks som produkt utöver pyrolysolja. En viss mängd koks kan blandas i pyrolysoljan utan att oljans egenskaper påverkas alltför mycket, 10 vikt-% koks i oljan medför inga större förändringar enligt Ngoc Trinh et al [15].

Det finns inga anläggningar i Sverige idag som producerar eller förbränner pyrolysslurry, dock finns anläggningar i bland annat Kanada [15].

3 Transport av bioenergi i Sverige

Hur transport av bioenergi utformas beror till stor del på formen av bioenergi. Flis och pellets är fast bulk gods som transporteras i lösa mängder i olika typer av behållare, pyrolysslurry som flytande bulk i tankar och rundvirke i särskilda timmertransporter. I detta kapitel beskrivs transport av bioenergi i form av fast och flytande bulk.

3.1 Fast bulk gods

Bioenergi i form av flis och pellets transporteras med lastbil, tåg och/eller fartyg. Lastbil används för kortare transportsträckor och mindre volymer medan tåg och fartyg används för större volymer och på längre avstånd. Den största andelen bioenergi i form av fast bulk gods transporteras i dagsläget med lastbil. Tåg används i vissa större försörjningskedjor medan fartyg används för import av bränsle, exempelvis från Baltikum. Fartyg skulle också vara en möjlig lösning för längre transporter inom Sverige, exempelvis söderut längs ostkusten, men något sådant upplägg förekommer inte i dagsläget. Detta är framförallt aktuellt för kraftvärmeverk i direkt anslutning till hamn eller med egen kaj.

Längre, landbaserade transporter sker till svenska kraftvärmeverk från huvudsakligen tre olika typer av avsändare:

- Skogsterminaler, ofta belägna i skogrika områden i norra Sverige, Småland/ Västergötland/ Halland, eller i Norge. Dessa är antingen öppna terminaler som drivs av neutrala operatörer eller ägs av skogsindustriföretag och hanterar företagets egna produkter
- Sågverk eller andra skogsindustriföretag i samma skogsrika områden
- Torrbulkshamnar, på ost- eller västkusten eller i Mälardalen

Transportresurserna som används i tågtransporter, men även till stor del lastbilstransporter, med biobränsle utnyttjas ofta bara enkel väg och går tomma i retur. Anledningen till det är framförallt låg eller obefintlig efterfrågan på transporter i motsatt riktning (från tätbefolkade områden till skogsområden), men även till viss del att lastbärarna ofta är optimerade för det aktuella godset samt att risk för kontaminering av varor föreligger om olika typer av gods fraktas i samma lastbärare.

3.1.1 Lastbilstransport

Lastbilstransport används dels för bränsle producerat i närheten av den förbrukande anläggningen, på avstånd mindre än 25 mil men ofta kortare, eller för forsling till eller från en terminal för omlastning till annat trafikslag (tåg eller fartyg). Det finns också exempel med längre lastbilstransporter, men då ingår ofta en kompletterande transport av annat gods i den motsatta riktningen i upplägget.

Flera olika typer av lastbilar används för bioenergitransporter. Lastbilar utrustade med växelflakssystem kan lastas med tre containrar, som i sin tur kan ställas av ute i skogen för att fyllas eller lastas på en järnvägsvagn. Vidare används exempelvis sidtippande flisbilar, som lastas med exempelvis flis med hjälp av extern lastutrustning samt andra specialutrustade lastbilar.

3.1.2 Tågtransport

Tågtransporter har en hög andel fasta kostnader och kräver därmed stora godsvolymer och längre transportavstånd för att vara ekonomiskt hållbart. Vidare krävs ofta en terminalhantering vilket också adderar kostnader. Vissa kraftvärmeverk har järnvägsspår indragna till den egna anläggningen, vilket underlättar järnvägstransporter. Finns inte tillgång till egna spår måste omlastning ske på en närliggande terminal till en lokal lastbilstransport. Sammantaget ger detta följande tre förutsättningar för att tågtransport ska vara aktuellt för ett kraftvärmeverk:

- Tillgång till järnvägsspår på egna anläggningen eller till en extern omlastningsterminal på rimligt avstånd
- Förbrukning av tillräckligt stor volym bibränsle för att bära upp ett tågupplägg, både sett till tillräckligt hög leveransfrekvens och högt utnyttjande av lastkapaciteten i varje tåg
- Inte tillräckligt stor lokal tillgång på bibränsle för att kunna tillgodose behovet med kortare lastbilstransporter. Detta innebär att kraftvärmeverk i mer tätbefolkade områden med relativt långt till råvarutillgången, exempelvis Mälardalsområdet och Skåne, är mer aktuella för tågtransporter än exempelvis större städer på Norrlandskusten.

Den dominerande lastbäraren på marknaden är Innofreight-containerar. Den vanligaste typen rymmer 46 m³ och lastas två eller tre stycken på varje järnvägsvagn, beroende på typen av vagn. De fylls med exempelvis flis stående på tågvagnen av en lastmaskin som skopar upp bränslet från högar på marken och tömmer i containrarna. Tömning av containrarna sker med hjälp av en truck utrustad med ett specialtillverkat vriddon som lyfter av containern från tågvagnen och vrider den uppochner. Innofreightcontainerar kan också lastas på bil, men på grund av containerns dimensioner, som är optimerade för effektiva tågtransporter, krävs i så fall specialtillstånd för lastbilstransporten.

I andra fall används vanliga 20-fotscontainrar, som inte kräver specialutrustning och kan flyttas över till/från en lastbil, men å andra sidan inte är optimerade för flistransport, varför den fraktade volymen blir mindre.

De flesta idag existerande tåguppläggen går i 24-timmarscykler eller kortare, ofta med 1-4 tåg i veckan under bränslesäsongen (vinterhalvåret). I de tågupplägg som kartlagts i tidigare studier [16] transporteras totalt mindre än 2000 GWh bibränsle med tåg årligen, vilket endast utgör några procent av den totala användningen i Sverige.

3.1.3 Terminalhantering

Terminalernas funktion kan utöver själva omlastningen också vara lager och/eller buffert för över tid ojämn tillgång och efterfrågan på olika typer av bibränsle. Karaktäristiskt för bibränsletransporter är bland annat säsongsvariationer både vad gäller skörd/produktion och användning. Detta utgör ännu en utmaning för järnvägstransporter, som är mindre flexibla till sin natur än lastbilstransporter. Lagring tas dock inte hänsyn till i denna studie utan terminalen fungerar endast som en omlastningspunkt för över året kontinuerliga transporter.

3.1.4 Fartygstransport

För fartygstransport med biobränsle används torrbulksfartyg. Eftersom biobränsle har låg densitet jämfört med mycket annat bulk gods som fraktas med sådana fartyg, är volymen den begränsande faktorn för laststorleken. Ofta används mindre fartyg med lastkapacitet på 3000-5000 ton för import till Sverige. [16]

3.2 Flytande bulk gods

Bioenergi i form av pyrolysvätska transporteras som flytande bulk gods. Pyrolysvätska har dock vissa speciella egenskaper som påverkar transporten. Vätskan är korrosiv och har lågt pH-värde ($\text{pH} < 2$) vilket innebär att transport och hantering måste ske i rostfria, syrabeständiga behållare. Den avger gaser som är giftiga och innebär explosionsrisk, vilket också påverkar hanteringen. Vidare är vätskan inte beständig över tid och behöver varmhållas under transport för lägre viskositet och för att inte vissa beståndsdelar ska stelna. Men temperaturen får inte heller bli för hög då det finns risk att vätskan reagerar med sig själv. [17]

Andra produkter med liknande egenskaper är petrokemins tyngre fraktioner, väteperoxid till massaindustrin och råtalldiesel. Men på grund av de speciella egenskaperna och risk för kontaminering är det troligtvis svårt att kombinera transport av pyrolysvätska med annat gods varför en transportlösning antagligen skulle kräva dedikerad transportutrustning på samma sätt som för flis och pellets som beskrivits ovan. [17]

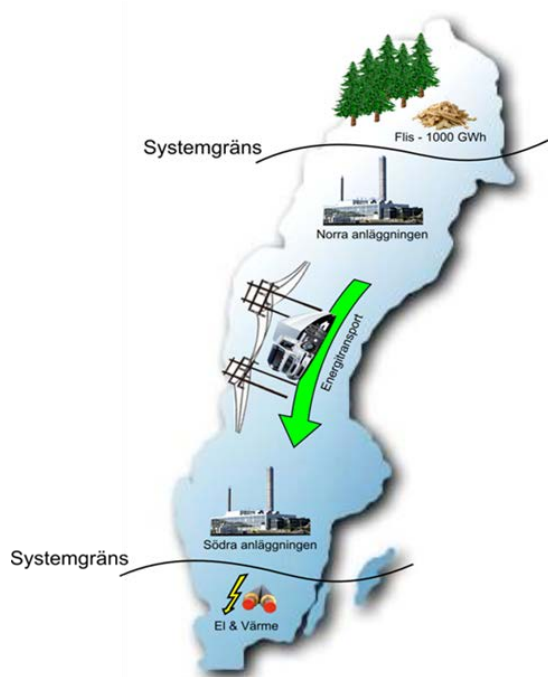
Inom ramen för denna studie har inga befintliga transportupplägg för pyrolysslurry kunnat studeras, varför antaganden har gjorts utifrån hur tågtransporter och hantering av andra kemiska produkter och oljeprodukter sker. Tågtransporten antas ske i isolerade tankvagnar med varmhållningsutrustning och vätskan pumpas över till cistern på en terminal (eller oljehamn). Tankbilar fraktar oljan vidare till kraftvärmeverket. Pyrolysslurryns egenskaper innebär dock miljö- och hälsorisker vid en eventuell olycka, vilket ställer krav på omlastningspunkten. Det gör att antalet potentiella omlastningspunkter är begränsade. För kraftvärmeverk som inte ligger i närheten av en sådan punkt (troligtvis en oljehamn eller oljeterminal) skulle annars egna järnvägsspår in på anläggningen krävas för att pyrolystransport med järnväg skulle vara möjlig.

4 Fallstudie

Upplägget på fallstudien beskrivs inledningsvis översiktligt och senare i detalj för respektive fall. Den detaljerade beskrivningen av varje fall i fallstudien är uppdelad enligt följande; (1) Norra anläggningen, (2) Transport, (3) Södra anläggningen.

4.1 Övergripande beskrivning av fallstudien

Upplägget innebär att 1 000 GWh biomassa i form av fuktig flis (definierad i kapitel 4.2.1) återfinns i närhet till skog i norra Sverige och ska transporteras i förädlad eller oförädlad form till södra Sverige. I anslutning till biomassan i norr finns en anläggning där förädlingen sker, i söder finns ett kraftvärmeverk där biomassan förbränns för att producera el och fjärrvärme (se Figur 6). Till varje fall anpassas ett transportalternativ för att passa respektive biobränsle med avseende på typ, vikt och volym.

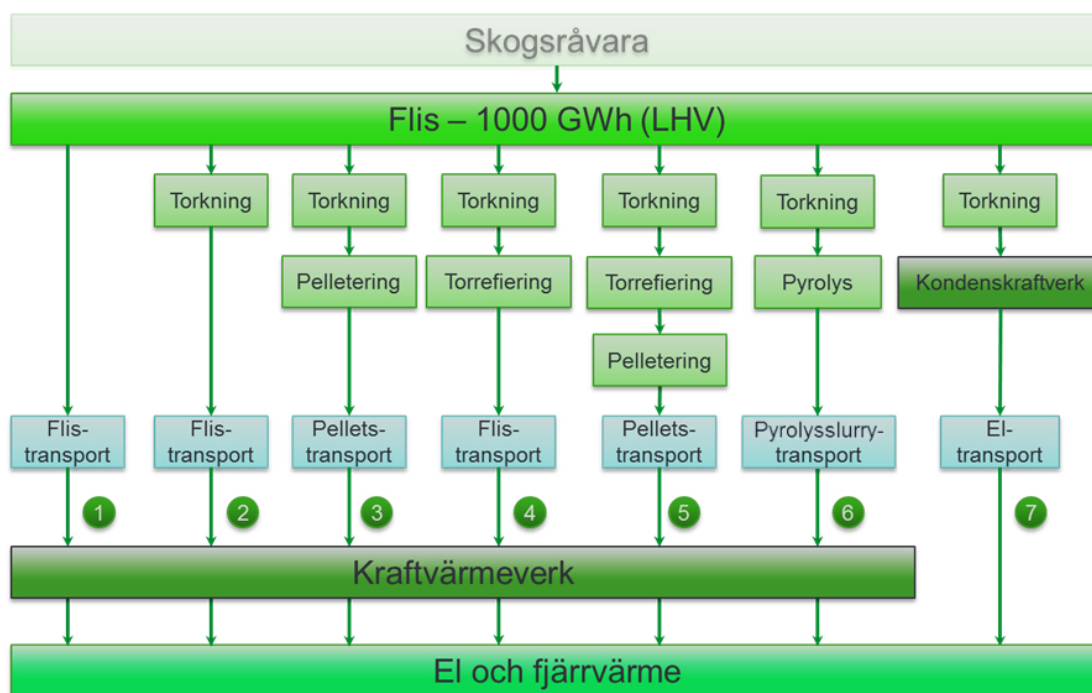


Figur 6. Illustration som visar upplägget på fallstudien

Figure 6. Illustration showing the boundaries of the case study

Fallstudien bygger på sju beräkningsfall varav sex innefattar olika förädlingsprocesser och ett är ett referensfall med transport av oförädlad fuktig flis. De sju fallen är definierade enligt följande och ses schematiskt i Figur 7;

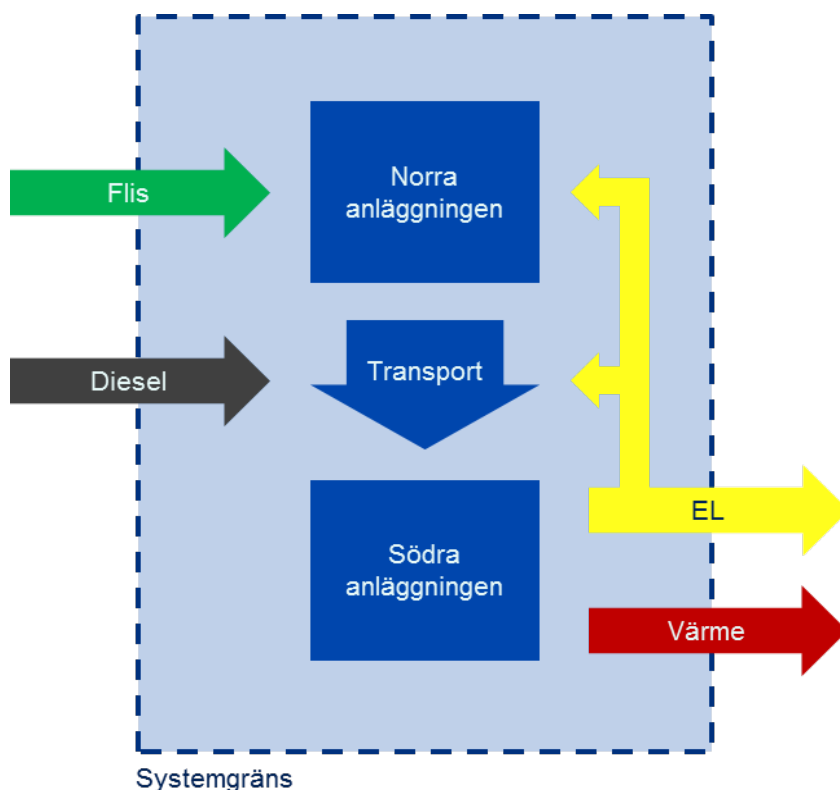
1. Fuktig flis
2. Torkad flis
3. Vit pellets
4. Torrefierad flis
5. Svart pellets
6. Pyrolysisprodukter
7. El i kondenskraftverk



Figur 7. Illustration som schematiskt visar upplägget på fallstudien; 1 – Fuktig flis, 2 – Torkad flis, 3 – Vit pellets, 4 – Torrefierad flis, 5 – Svart pellets, 6 – Pyrolys, 7 – El i kondenskraftverk

Figure 7. Illustration showing the key arrangements of the case study; 1 – Undried chips, 2 – Dried chips, 3 – White pellets, 4 – Torrefied chips, 5 – Black pellets, 6 – Pyrolysis, 7 – Electricity

Gemensamt för alla förädlingsprocesser är att de endast får sin energi från flisen på ett eller annat sätt, illustrerat i Figur 8. Transportenergin som krävs i transporten från norr till söder redovisas separat som en förbrukning av extern energi (diesel). Den el som går åt inom systemet tas från den el som produceras inom systemet.



Figur 8. Illustration som visar energiflödena i systemet

Figure 8. Illustration showing the flows of energy in the system

Som förenkling fördelas bibränslet jämt över året, utan hänsyn till värmeunderlag eller variationer i bränsletillgång. Dimensionering av anläggningar och transport görs därefter.

4.1.1 Norra anläggningen

Den norra anläggningen har geografiskt valts att placeras ett par mil öster om Skellefteå och den södra anläggningen i Mälardalen, avståndet mellan anläggningarna är cirka 800 km.

Den teknikmässiga omfattningen av anläggningen i norr varierar med förädlingsprocess och beskrivs under respektive delkapitel för respektive fall. Den värme som krävs i förädlingsprocesser i norra anläggningen hämtas internt inom anläggningen, antingen genom att värme från förädlingsprocessen används, alternativt att värme produceras i ett för värmebehovets storlek anpassat fliseldat värmeverk. Dimensionering av ingående anläggningar görs utifrån förenklingen att bibränslemängden fördelas jämt över året, utan hänsyn till eventuellt varierande värmeunderlag.

Alla förädlingsprocesser i norra anläggningen får sin energi från flisen, vilket gör att flisens ursprungliga energimängd på 1 000 GWh minskar vid varje förädlingssteg. Förädlingen påverkar också bibränslets egenskaper, sammansättning, värmevärde och densitet, som i sin tur påverkar efterföljande transport och förbränning i södra anläggningen.

4.1.2 Transport av bioenergi

Transport av bränslen sker för samtliga fall i fallstudien med tåg och lastbil men med olika upplägg gällande omlastning och behållare beroende på biobränsle enligt följande;

1. Flis- och pelletstransport (fast bulkgoods)
2. Pyrolysslurrytransport (flytande bulkgoods)

Verklighetsbaserade transportalternativ med tåg och lastbil har tagits fram utifrån typ, vikt och volym för respektive transportsätt. Energiåtgång, kostnad och tidsåtgång för transport har uppskattats för vart och ett av de sex fall som inkluderar en transport. Bränsleflödet sprids ut jämnt över året. Mängden biobränsle som ska transporteras beror på förädlingsprocess i norra anläggningen. Transport av el (fall 7) sker via kabel i det fall endast el ska transporteras från norr till söder.

Den norra anläggningen har geografiskt valts att placeras strax utanför Skellefteå och den södra anläggningen i Mälardalen. Den norra anläggningen antas vara placerad i anslutning till järnvägsspår, med ett eget elektrifierat sidospår in på anläggningens område. Detta innebär att bränslet kan lastas direkt på tåget utan föregående forsling med lastbil. Vid södra anläggningen antas att omlastning från tåg till lastbil sker vid en terminal eller oljehamn i närheten. Avståndet mellan den norra anläggningen och terminalen antas vara 800 km och avståndet mellan terminalen och den södra anläggningen antas vara 20 km. Tågtransporten bedöms ta knappt 15 timmar enkel väg (under den tid tåget rullar, med en medelhastighet av 55 km/h) och lastbilstransporten 30 minuter (eftersom transporten antas ske genom stadsmiljö).

Fall 1-5 innebär transport av fast bulkgoods i form av flis eller pellets. Dessa fall har behandlats likvärdigt och det enda som varierar mellan fallen är

- Mängden gods som ska transporteras (antal ton per år)
- Densiteten hos godset

Fall 6 innebär transport av flytande bulkgoods.

Den totala transporten från norra till södra anläggningen har delats upp i ett antal delaktiviteter som var och en driver kostnader, tid och energiförbrukning, nämligen

- Lastning av tåg vid norra anläggningen
- Växling av tåg in och ut mellan industrispårerna vid norra anläggningen och intilliggande bana
- Tågtransport, inklusive tom returtransport
- Växling av tåg in och ut mellan terminalområde och intilliggande bana
- Omlastning av gods från tåg till lastbil vid terminal/oljehamn
- Lastbilstransport inklusive lossning av gods vid södra anläggningen

För transport av torr bulk har värden och beräkningsstruktur till stor del hämtats från en kalkylmodell utvecklad vid Handelshögskolan vid Göteborgs Universitet [18] för just biobränsletransporter. Viss anpassning värden och struktur har gjorts för de specifika fallen i denna studie. Flisen eller pelletsen antas lastas i Innofreightcontainrar stående på tåget inne på den norra anläggningen, med hjälp av hjullastare, från stackar på marken

intill spåren. Efter tågtransport töms containrarna på terminalen med hjälp av en specialanpassad truck, bränslet stackas sedan med hjullastare. Dessa maskiner lastar sedan en sidtippande flisbil som forslar bränslet till den södra anläggningen och tippar av det inne på området för att därefter gå tom tillbaka till terminalen. Även tåget återvänder till norra anläggningen utan last.

För transport av flytande bulk har värden baserade på erfarenhetsmässiga uppskattningar och upplysningar från branschen använts i en förenklad version av samma beräkningsstruktur som för torr bulktransport. Slurryn pumpas till tankvagnar kopplade till loket inne på den norra anläggningen. Vagnarna är isolerade och har utrustning för att varmhålla pyrolysslurryn under transport med hjälp av el som tas från loket. Tåget anländer till en oljehamn eller motsvarande terminal, där slurryn pumpas över till en cistern. Därifrån pumpas slurryn över till tankbilar som forslar bränslet in till södra anläggningen.

För varje fall beräknas sändningsstorlekar för tåg och lastbil, med antagandet att varje fordon utnyttjas maximalt givet att både vikt- och volymrestriktioner uppfylls (samt längd för tåg). Eftersom det rör sig om en lång transportsträcka och tåget dessutom behöver stå still vid lastning och lossning, krävs fyra 12-timmarscykler (eller två dygn) för ett tågomlopp i samtliga fall. Det innebär att vissa av fallen kräver att mer än ett tågsätt utnyttjas parallellt vilket får implikationer för hur många lok, vagnar och lastbärare som krävs. I kostnadsberäkningen antas lok, vagnar och lastbärare vara dedikerade till det aktuella transportupplägget och inte användas till andra syften vid tid som eventuellt blir över. Upplägget bär således samtliga kostnader för denna utrustning. Personal, terminalutrustning samt lastbilar utnyttjas dock på timbasis.

De generella beräkningsförutsättningarna återfinns i Bilaga B. Det som skiljer de respektive fallen åt beskrivs i efterföljande delkapitel. Det bör påpekas att kostnadsuppskattningarna är grova, framför allt de delar som berör terminalhanteringen, något som varierar kraftigt även i verkligheten. Kostnadsuppskattningarna är intressanta att studera framförallt som jämförelse mellan olika fall och inte sett till totalnivåerna.

För att begränsa arbetet behandlas inte tids- och lagringsaspekter i projektet. Majoriteten av energiförlusterna antas uppstå vid förädling och transport. Kostnader för lagring på terminal och cisternhyra i oljehamn är därmed inte inkluderade i beräkningarna.

4.1.2.1 Känslighetsanalys - fartygstransport

En förenklad analys har även gjorts för en variant på transportupplägg, som innebär att tågtransporten ersätts av en fartygstransport. Beräkningar har gjorts för fall 1 (fuktig flis, vilket innebär fast bulkods) och fall 6 (pyrolysslurry, vilket innebär flytande bulkods). I denna analys antas att lastbilstransporten istället sker i början av transporten, där godset fraktas från skogsterminalen ut till en hamn på ostkusten. I hamnen lastas godset på ett bulkfartyg på 3 500 dwt som fraktar godset hela vägen fram till den södra anläggningen, som antas ha en egen kaj där lossning sker direkt in på anläggningen. Det antas att vägtransporten i de båda fallen (norra anläggningen-hamn respektive terminal-södra anläggningen) är lika långa, varför kostnader och energiåtgång blir desamma för denna, inklusive lastning och lossning av godset. Således kvarstår endast den långväga transporten med tåg respektive fartyg att jämföra, inklusive lastning och lossning.

Transportavståndet för fartyget antas vara 800 km enkel väg och medelhastigheten 15 knop. Resultatet av känslighetsanalysen presenteras i kapitel 6.6.

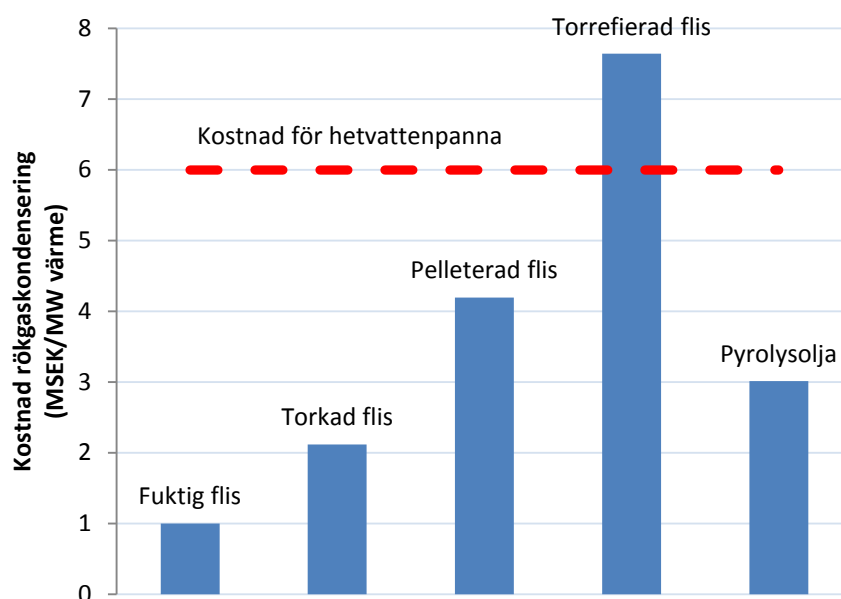
För analysen av kostnader har värden från Trafikverkets nationella godstransportprognosmodell Samgods använts [19]. I denna anges tids- och avståndsberoende transportkostnader, lastnings- och lossningskostnader, lots-, farleds- och banavgifter samt ett antal andra attribut för en rad olika typfordon. För att beräkningarna ska bli jämförbara, har de utförts för såväl järnvägs- som fartygstransporten utifrån samma typ av beräkningsförutsättningar. De respektive resultaten har sedan jämförts och kostnaderna för fartygstransporten beräknats relativt det ursprungliga resultatet för järnväg.

För analys av energiåtgång har värden för genomsnittlig bränsleförbrukning för ett liknande fartyg samt energiinnehåll i bränslet hämtats från NTM [20]. Dessa värden har applicerats på det transportupplägg för fartygstransporter som skapades i samband med kostnadsberäkningarna. Alla beräkningsförutsättningar återfinns i bilaga B.

4.1.3 Södra anläggningen

Anläggningen i söder utgörs av ett kraftvärmeverk i norra Mälardalen som anpassas utefter vilket bränsle som ska förbrännas, med ett representativt alfavärde för ett modernt biobränsleeldat kraftvärmeverk. Dimensionering av anläggningen görs utifrån förenklingen att biobränslet levereras till anläggningen jämnt över året, utan hänsyn till värmeunderlag. Anläggningen körs således på fullast hela året, oavsett bränsle. Specifikationerna och dimensioneringen av anläggningen redovisas under respektive fall i fallstudien.

I de fall det har bedömts lönsamt att installera rökgaskondensering, utifrån att anläggningen är i full drift året runt, har anläggningen försetts med rökgaskondensering (RGK). En lönsamhetsberäkning, där investeringskostnaden för rökgaskondensering med aktuellt bränsle ställs mot investeringskostnaden för att bygga en ny hetvattenpanna, har genomförts och ligger till grund för vilka fall som förses med rökgaskondensering. Beräkningen utgår från en kostnad för en nyckelfärdig hetvattenpanna på 6 Mkr/MW värme och att extrakostnaden för att lägga till rökgaskondensering är ca 1 Mkr/MW värme för fuktigt bränsle. Kostnaden per MW värme ökar därför linjärt om samma anläggning eldas med torrare bränsle och effekten från rökgaskondenseringen minskar. I fallet med torrefierad flis är kostnaden för den värme som erhålls i en rökgaskondensering dyrare än att kostnaden för värme som produceras i en hetvattenpanna och RGK har därmed ej använts.



Figur 9. Lönsamhetsindikation för rökgaskondensering vid förbränning av olika typer av bränslen

Figure 9. Indication of profitability with flue gas condensation for combustion of different types of fuel

4.2 Beräkningsförutsättningar

4.2.1 Flissammansättning

WSP har under åren byggt upp en egen databas över olika bränslen med deras sammansättning och värmevärde. Från denna databas har ett urval gjorts av träbaserat biobränsle i form av grot, bark och ren ved. Ett medelvärde för sammansättning och värmevärde har tagits fram för detta urval, vilket senare använts vid förädlingsberäkningarna i fallstudien. Sammansättningen redovisas i Tabell 1. Askhalten indikerar att blandningen till stor del består av bark och grot. Fukthalten på 50 vikt-% antyder att biobränslet hämtats direkt från skogen, utan att ha torkat på hygget.

Tabell 1. Sammansättning på den fuktiga flis som använts vid beräkningarna

Table 1. Composition of the moist wood chips used in the calculations

Ämne	Enhet ²	Värde
C	vikt-% taf	51,7
H	vikt-% taf	6,0
O	vikt-% taf	42,0
N	vikt-% taf	0,3
S	vikt-% taf	0,03
Aska	vikt-% t	1,8
Fukt	vikt-%	50
Eff. värmevärde	MJ/kg ts	20,2
Densitet	kg/m ³ s	310

4.2.2 Mass- och energibalanser

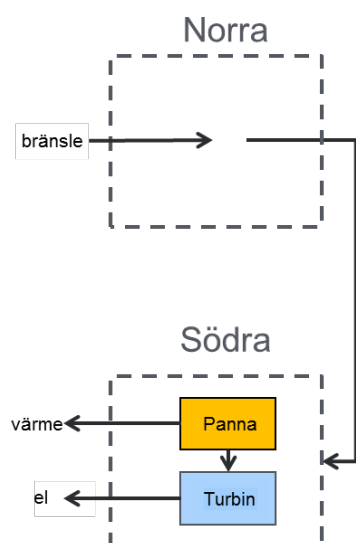
Förbränningsberäkningar förekommer i samtliga fall. Indata till dessa är hämtade från konventionella men nyare anläggningar avseende exempelvis luftöverskott, rökgastemperatur efter ekonomiser med mera. Pannorna anses vara anpassade för respektive bränsle och eftersom varken last eller fukthalt för bränslet varierar över året så tillämpas ingen rökgasåterföring i något fall. Beräkningarna är gjorda i WSP:s förbrännings- och panndimensioneringsprogram. Sammansättning och kalorimetriskt värmevärde för respektive bränsle är i huvudsak inhämtat från litteratur. Avseende specifika indata till torrefierings- och pyrolysfällen har så mycket data som möjligt baserats på ett nyligen genomfört Värmeforskprojekt Gustavsson m.fl. [12], speciellt avseende massbalans för torrefiering och pyrolys samt produkternas kalorimetriska värmevärde. Förbrukningsdata för pelletering är inhämtat från leverantör.

I dagsläget finns inte många kommersiella pyrolys- och torrefieringsanläggningar att hämta kompletta mass- och energibalanser från och i dessa fall har anläggningarna satts samman så att befintliga data kring utbyten och energibehov balanseras.

4.3 Fall 1 – Fuktig flis

Skogsflis transporteras oförädlat som fast bulk gods från norra till södra anläggningen för förbränning i ett kraftvärmeverk.

² t = torr, ts = torrsubstans, taf = torr, askfri



Figur 10. Schematisk beskrivning av fall 1, fuktig flis

Figure 10. Schematic description of case 1, wood chips

4.3.1 Norra anläggningen

Ingen förädling sker i norra anläggningen utan anläggningen fungerar endast som en terminal för lastning av järnvägsvagnar.

4.3.2 Transport

Generella förutsättningar för transporten beskrivs ovan (kapitel 4.1.2 Transport av bioenergi) samt i Bilaga B.

Tabell 2. Beräkningsförutsättningar för transport av fuktig flis

Table 2. Wood chips-specific transport input data

	Värde	Enhet
Mängd bränsle, energi	1 000	GWh/år
Mängd bränsle, vikt	414 000	ton/år
Densitet	310	kg/m ³ s
Mängd bränsle, volym	1 330 000	m ³ s/år

För fuktig flis är det volymen (och inte vikten) som är den begränsande faktorn för fyllnadsgraden i tågagnarna. Restriktioner för tågets totalvikt (last, vagnar samt lastbärare, givet ett lok) avgör hur många vagnar som ryms i varje tågsätt – 32 stycken. Det innebär 464 tågomlopp per år vilket kräver 3 tågsätt för att kunna transportera hela volymen under ett år. Tidsåtgång för lastning respektive lossning av tåget är 4 timmar vardera och lastning och lossning av flisbilen beräknas ta sammanlagt 30 minuter per omlopp. För lastbilstransporten är det vikten snarare än volymen som är den begränsande faktorn för sändningsstorleken, som ger en fyllnadsgrad av 90 % sett till volym. Det innebär knappt 11 000 lastbilsomlopp per år.

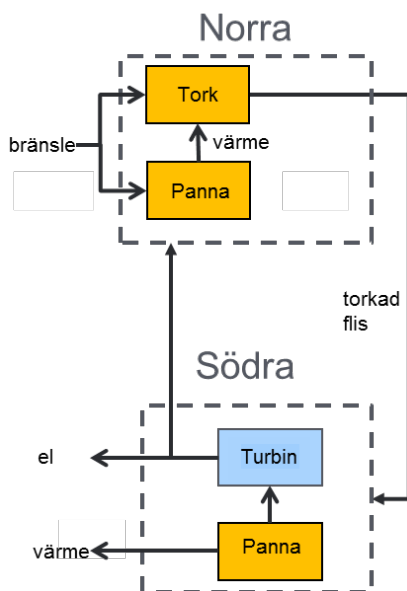
4.3.3 Södra anläggningen

Södra anläggningen innefattar ett kraftvärmeverk där den fuktiga flisen förbränns i en CFB-panna och el genereras i en ångturbin. Anläggningen inkluderar rökgaskondensering. Ångdata för kraftvärmepannan är 540°C och 140 bar. För ångturbinen har ett alfavärde på 0,6 använts.

Övriga indata till förbränningsberäkningarna återfinns i Bilaga A.

4.4 Fall 2 – Torkad flis

Skogsflis torkas i en bäddtork i norra anläggningen. Den värme som krävs för torkning produceras med en hetvattenpanna. Den torkade flisen transporteras som fast bulk gods till södra anläggningen för förbränning i kraftvärmeverk.



Figur 11. Schematisk beskrivning av fall 2, torkad flis

Figure 11. Schematic description of case 2, dried chips

4.4.1 Norra anläggningen

De 1000 GWh flis som finns tillgängligt fördelas i två strömmar där större delen går till torken och en mindre del till hetvattenpannan som förser torken med värme via en luft/vattenvärmeväxlare. Flisen torkas från 50 % till 30 % fukthalt. Torken är en bäddtork som använder varmluft av 80°C som torkmedium. Hetvattenpannan har en verkningsgrad på 90 % och drifttryck- och temperatur på 10 bar respektive 150°C samt är försedd med rökgaskondensering.

Övriga indata till anläggningsberäkningarna återfinns i Bilaga A.

4.4.2 Transport

Generella förutsättningar för transporten beskrivs ovan (kapitel 4.1.2 Transport av bioenergi) samt i Bilaga B.

Tabell 3. Beräkningsförutsättningar för transport av torkad flis

Table 3. Dried wood chips-specific transport input data

	Värde	Enhet
Mängd bränsle, energi	977	GWh/år
Mängd bränsle, vikt	267 000	ton/år
Densitet	260	kg/m ³ s
Mängd bränsle, volym	1 030 000	m ³ s/år

För torkad flis är det volymen (och inte vikten) som är den begränsande faktorn för fyllnadsgraden i tågagnarna. Restriktioner för tågets totalvikt (last, vagnar samt lastbärare, givet ett lok) avgör hur många vagnar som ryms i varje tågsätt – 35 stycken. Det innebär 327 tågomlopp per år vilket kräver 2 tågsätt för att kunna transportera hela volymen under ett år. Tidsåtgång för lastning respektive lossning av tåget är 4 timmar vardera och lastning och lossning av flisbilen beräknas ta sammanlagt 30 minuter per omlopp. För lastbilstransporten är det också volymen snarare än vikten som är den begränsande faktorn för sändningsstorleken. Det innebär drygt 7 300 lastbilsomlopp per år.

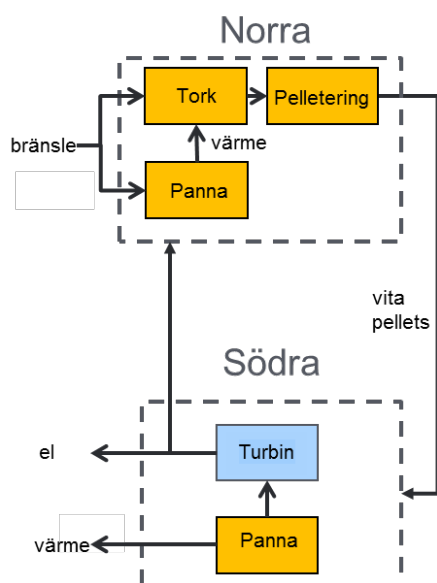
4.4.3 Södra anläggningen

Södra anläggningen innefattar ett kraftvärmeverk där den torkade flisen förbränns i en CFB-panna och el genereras i en ångturbin. Anläggningen inkluderar rökgaskondensering. Ångdata för kraftvärmepannan är 540°C och 140 bar. För ångturbinen har ett alfavärde på 0,6 använts.

Övriga indata till förbränningsberäkningarna återfinns i Bilaga A.

4.5 Fall 3 – Vit pellets

Skogsflis torkas och pelleteras i norra anläggningen. Pelletsen transporteras som fast bulk gods till södra anläggningen för förbränning i ett kraftvärmeverk.



Figur 12. Schematisk beskrivning av fall 3, vit pellets

Figure 12. Schematic description of case 3, white pellets

4.5.1 Norra anläggningen

De 1000 GWh flis som finns tillgängligt fördelas i två strömmar där större delen går till torken och en mindre del till hetvattenpannan som förser torken med värme via en luft/vattenvärmeväxlare. Flisen torkas från 50 % till 10 % fukthalt, mals i kvarn och pelleteras därefter. Torken är en bäddtork som använder varmluft av 80°C som torkmedium. Hetvattenpannan har en verkningsgrad på 90 % och drifttryck- och temperatur på 10 bar respektive 150°C samt är försedd med rök-gaskondensering.

Övriga indata till anläggningsberäkningarna återfinns i Bilaga A.

4.5.2 Transport

Generella förutsättningar för transporten beskrivs ovan (kapitel 4.1.2 Transport av bioenergi) samt i Bilaga B.

Tabell 4. Beräkningsförutsättningar för transport av vit pellets

Table 4. White pellets-specific transport input data

	Värde	Enhet
Mängd bränsle, energi	965	GWh/år
Mängd bränsle, vikt	197 000	ton/år
Densitet	625	kg/m ³ s
Mängd bränsle, volym	316 000	m ³ s/år

För vit pellets är det vikten (och inte volymen) som är den begränsande faktorn för fyllnadsgraden i tåg-vagnarna, vilket innebär en fyllnadsgrad på 52 % sett till volym. Restriktioner för tågets totalvikt (last, vagnar samt lastbärare, givet ett lok) avgör hur

många vagnar som ryms i varje tågsätt – 31 stycken. Det innebär 218 tågomlopp per år vilket kräver 2 tågsätt för att kunna transportera hela volymen under ett år. Tidsåtgång för lastning respektive lossning av tåget är 4 timmar vardera och lastning och lossning av flisbilen beräknas ta sammanlagt 30 minuter per omlopp. För lastbilstransporten är det också vikten snarare än volymen som är den begränsande faktorn för sändningsstorleken, vilket ger en fyllnadsgrad sett till volym på 44 %. Det innebär 5 000 lastbilsomlopp per år.

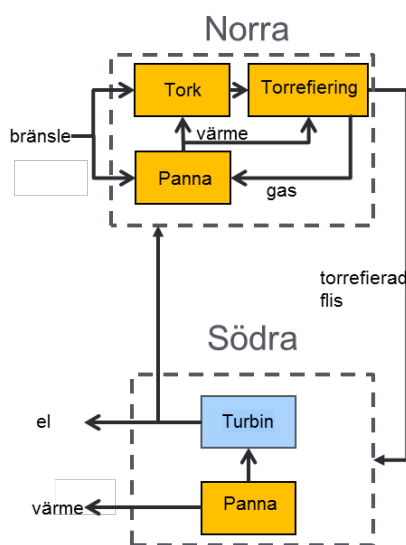
4.5.3 Södra anläggningen

Södra anläggningen innefattar ett kraftvärmeverk där pelletsen mals och förbränns i en pulvereldad panna och el genereras i en ångturbin. Anläggningen inkluderar rökgaskondensering. Ångdata för kraftvärmepannan är 540°C och 140 bar. För ångturbinen har ett alfavärde på 0,6 använts.

Övriga indata till förbränningsberäkningarna återfinns i Bilaga A.

4.6 Fall 4 – Torrefierad flis

Skogsflis torkas i en bäddtork och torrefieras i en torrefieringsreaktor i norra anläggningen. Den värme som krävs för torrefiering produceras internt i norra anläggningen i en hetvattenpanna. Den torrefierade flisen transporteras som fast bulk gods till södra anläggningen för förbränning i kraftvärmeverk.



Figur 13. Schematisk beskrivning av fall 4, torrefierad flis

Figure 13. Schematic description of case 4, torrefied chips

4.6.1 Norra anläggningen

De 1000 GWh flis som finns tillgängligt fördelas i två strömmar där större delen går till torken och en mindre del till hetvattenpannan som förser torken med värme via en luft/vattenvärmeväxlare. Flisen torrefieras i en torrefieringsreaktor som drivs med värme

producerad i hetvattenpannan. Utöver torrifierad flis produceras också torrefieringsgas i reaktorn. Denna gas eldas tillsammans med en viss mängd flis för att generera värme till processen.

Flisen torkas från 50 % till 10 % fukthalt. Torken är en bäddtork som använder varmluft av 80°C som torkmedium. Hetvattenpannan har en verkningsgrad på 90 % och drifttryck- och temperatur på 10 bar respektive 150°C samt är försedd med rökgaskondensering.

Vid torrefiering minskar fukthalten i bränslet ned till i princip 0 %. Energimässiga utbytet av torrefierad flis jämfört med fuktig flis in är knappt 95 %, baserat på effektivt värmevärde.

Övriga indata till anläggningsberäkningarna återfinns i Bilaga A.

4.6.2 Transport

Generella förutsättningar för transporten beskrivs ovan (kapitel 4.1.2 Transport av bioenergi) samt i Bilaga B.

Tabell 5. Beräkningsförutsättningar för transport av torrefierad flis

Table 5. Torrefied wood chips-specific transport input data

	Värde	Enhet
Mängd bränsle, energi	886	GWh/år
Mängd bränsle, vikt	143 000	ton/år
Densitet	250	kg/m ³ s
Mängd bränsle, volym	573 000	m ³ s/år

För torrefierad flis är det volymen (och inte vikten) som är den begränsande faktorn för fyllnadsgraden i tågagnarna. Restriktioner för tågets totalvikt (last, vagnar samt lastbärare, givet ett lok) avgör hur många vagnar som ryms i varje tågsätt – 36 stycken. Det innebär 178 tågomlopp per år vilket kräver 1 tågsätt för att kunna transportera hela volymen under ett år. Tidsåtgång för lastning respektive lossning av tåget är 4 timmar vardera och lastning och lossning av flisbilen beräknas ta sammanlagt 30 minuter per omlopp. För lastbilstransporten är det också volymen snarare än vikten som är den begränsande faktorn för sändningsstorleken. Det innebär drygt 4 100 lastbilsomlopp per år.

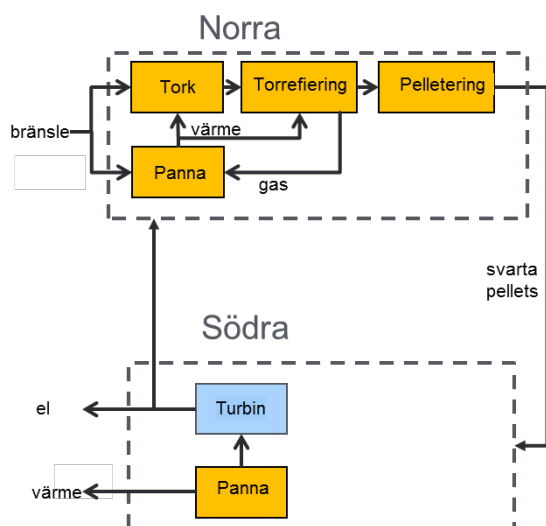
4.6.3 Södra anläggningen

Södra anläggningen innefattar ett kraftvärmeverk där den torrefierade flisen mals och förbränns i en pulvereldad panna och el genereras i en ångturbin. Ångdata för kraftvärmepannan är 540°C och 140 bar. För ångturbinen har ett alfavärde på 0,6 använts. Den torrefierade flisen tar upp ca 5 % fukt under lagring vilket gör att energimängden som går till kraftvärmepannan är drygt 0,5 % lägre än vad som genererades i torrefieringsreaktorn.

Övriga indata till förbränningsberäkningarna återfinns i Bilaga A.

4.7 Fall 5 – Svart pellets

Skogsflis torrefieras i en torrefieringsreaktor och pelleteras i norra anläggningen. Den värme som krävs för torrefiering produceras internt i norra anläggningen. Den torrefierade pelletsen transporteras som fast bulkgoods till södra anläggningen för förbränning i kraftvärmeverk.



Figur 14. Schematisk beskrivning av fall 5, svart pellets

Figure 14. Schematic description of case 5, torrefied pellets

4.7.1 Norra anläggningen

De 1000 GWh flis som finns tillgängligt fördelas i två strömmar där större delen går till torken och en mindre del till hetvattenpannan som förser torken med värme via en luft/vattenvärmeväxlare. Flisen torrefieras i en torrefieringsreaktor som drivs med värme producerad i hetvattenpannan, mals i kvarn och pelleteras därefter. Utöver torrefierad flis produceras också torrefieringsgas i reaktorn. Denna gas eldas tillsammans med en mindre mängd flis för att generera värme till processen.

Flisen torkas från 50 % till 10 % fukthalt. Torken är en bäddtork som använder varmluft av 80°C som torkmedium. Hetvattenpannan har en verkningsgrad på 90 % och drifttryck- och temperatur på 10 bar respektive 150°C.

Vid torrefiering minskar fukthalten i bränslet ned till i princip 0 %. Det energimässiga utbytet av torrefierad flis jämfört med fuktig flis in är knappt 95 %, baserat på effektivt värmevärde.

Övriga indata till anläggningsberäkningarna återfinns i Bilaga A.

4.7.2 Transport

Generella förutsättningar för transporten beskrivs ovan (kapitel 4.1.2 Transport av bioenergi) samt i Bilaga B.

Tabell 6. Beräkningsförutsättningar för transport av svart pellets

Table 6. Torrefied pellets-specific transport input data

	Värde	Enhet
Mängd bränsle, energi	886	GWh/år
Mängd bränsle, vikt	143 000	ton/år
Densitet	800	kg/m ³ s
Mängd bränsle, volym	179 000	m ³ s/år

För svart pellets är det vikten (och inte volymen) som är den begränsande faktorn för fyllnadsgraden i tågagnarna, vilket ger en fyllnadsgrad på 41 % sett till volym. Restriktioner för tågets totalvikt (last, vagnar samt lastbärare, givet ett lok) avgör hur många vagnar som ryms i varje tågsätt – 31 stycken. Det innebär 158 tågomlopp per år vilket inte kräver mer än ett tågsätt för att kunna transportera hela volymen under ett år. Tidsåtgång för lastning respektive lossning av tåget är 4 timmar vardera och lastning och lossning av flisbilen beräknas ta sammanlagt 30 minuter per omlopp. För lastbilstransporten är det också vikten snarare än volymen som är den begränsande faktorn för sändningsstorleken, vilket ger en fyllnadsgrad på 35 % sett till volym. Det innebär ca 3 700 lastbilsomlopp per år.

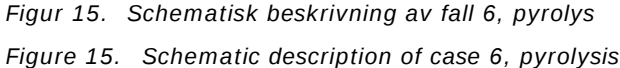
4.7.3 Södra anläggningen

Södra anläggningen innefattar ett kraftvärmeverk där den torrefierade och pelleterade flisen mals och förbränns i en pulvereldad panna och el genereras i en ångturbin. Ångdata för kraftvärmepannan är 540°C och 140 bar. För ångturbinen har ett alfavärde på 0,6 använts. Den torrefierade och pelleterade flisen antas ta upp ca 5 % fukt under lagring vilket gör att energimängden som går till kraftvärmepannan är drygt 0,5 % lägre än vad som genererades i torrefieringsreaktorn.

Övriga indata till förbränningsberäkningarna återfinns i Bilaga A.

4.8 Fall 6 – Pyrolysisprodukter

Skogsflis torkas i en bäddtork och pyrolyseras i pyrolyisreaktor. Pyrolysgas förväntas användas internt för att driva pyrolyisreaktionen och för produktion av värme till torkning av flisen. Produkten pyrolysslurry transporteras som flytande bulk gods i specialtankvagnar samt tankbilar till södra anläggningen för förbränning i kraftvärmeverk.



De 1000 GWh flis som finns tillgängligt torkas i en bäddtork och pyrolyseras i en pyrolyysreaktor, varpå tjärångor, gas och koks bildas. Pyrolyysreaktorn är en fluidbäddreaktor som drivs genom att varm sand (ca 850°C) tillförs från en anslutande förbränningsreaktor. I förbränningsreaktorn förbränns pyrolysgasen och delar av pyrolyskoksen, vilket genererar värme för att driva pyrolyysreaktionen, torka flisen och även producera ånga. Ångan genererar el i en ångturbin med alfavärde på 0,45. Tjärångorna kondenseras till en pyrolysslurry i en kondensor och blandas därefter med den koks som inte förbränts, vilket ger en pyrolysslurry. Andelen inblandad koks är ca 6 vikt-%.

Övriga indata till anläggningsberäkningarna återfinns i Bilaga A.

Generella förutsättningar för transporten beskrivs ovan (kapitel 4.1.2 Transport av bioenergi) samt i Bilaga B.

Tabell 7. Beräkningsförutsättningar för transport av pyrolysslurry

Table 7. Pyrolysis-specific transport input data

	Värde	Enhet
Mängd bränsle, energi	857	GWh/år
Mängd bränsle, vikt	183 000	ton/år
Densitet	1 200	kg/m ³ s
Mängd bränsle, volym	153 000	m ³ s/år

För pyrolysslurry är det vikten (och inte volymen) som är den begränsande faktorn för fyllnadsgraden i tågagnarna, vilket ger en fyllnadsgrad på 83 % sett till volym. Restriktioner för tågets totalvikt (last, vagnar samt lastbärare, givet ett lok) avgör hur många vagnar som ryms i varje tågsätt – 15 stycken. Det innebär 204 tågomlopp per år vilket kräver 2 tågsätt för att kunna transportera hela volymen under ett år. Tidsåtgång för lastning och lossning av tåget är 3 respektive 6 timmar³ och tankning och tömning av tankbilen beräknas ta sammanlagt 1 timme vardera. För lastbilstransporten är det också vikten snarare än volymen som är den begränsande faktorn för sändningsstorleken, vilket ger en fyllnadsgrad på 64 % sett till volym. Det innebär ca 4 800 lastbilsomlopp per år.

4.8.3 Södra anläggningen

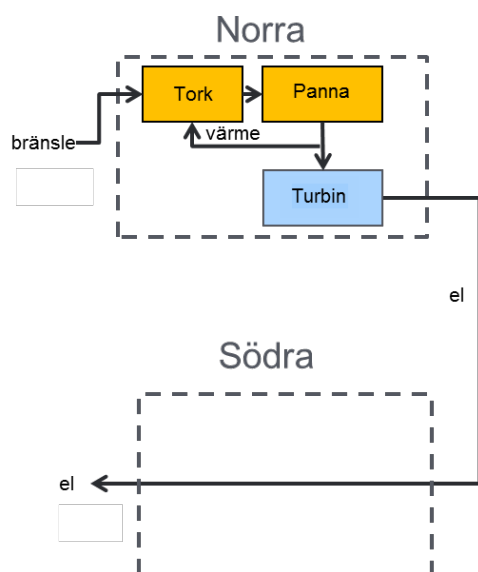
Södra anläggningen innefattar ett kraftvärmeverk där pyrolysslurryn förbränns i en oljepanna och el genereras i en ångturbin. Då endast en mindre viktsandel koks är inblandad i pyrolysoljan förväntas pyrolysslurryn kunna användas på samma sätt som olja. Ångdata för kraftvärmepannan är 540°C och 140 bar. För ångturbinen har ett alfavärde på 0,6 använts.

Övriga indata till förbränningsberäkningarna återfinns i Bilaga A.

4.9 Fall 7 – El i kondenskraftverk

Skogsflis torkas i en bäddtork och förbränns i ett kondenskraftverk för att producera el. Elen transporteras med kabel till södra anläggningen.

³ Det antas en effektivare pumpning på den norra anläggningen som är specialbyggd för pyrolyspanning, än på terminal/oljehamn.



Figur 16. Schematisk beskrivning av fall 7, elproduktion i kondenskraftverk

Figure 16. Schematic description of case 7, electricity production in condensing power plant

4.9.1 Norra anläggningen

De 1000 GWh flis som finns tillgängligt torkas i en bäddtork innan det matas in och förbränns i en CFB-panna. El genereras i en ångturbin. Torkluften förvärms till stor del med värme från kondensorn och spetsvärms till 80°C med en mindre avtappning från ångturbinen. Flisen torkas från 50 % till 10 % fukthalt. Den värme som inte används för torkning kyls bort. Anläggningen inkluderar rökgaskondensering. Ångdata för kraftvärmepannan är 540°C och 140 bar. För ångturbinen har ett alfavärde på 0,65 använts.

Övriga indata till förbränningsberäkningarna återfinns i Bilaga A.

4.9.2 Transport

Elen transporteras i kabel 800 km från norra till södra anläggningen.

Vid transport av el uppstår elnät förluster av olika omfattning beroende på i huvudsak överföringsavstånd, strömstyrka, kabelresistans och väder (temperatur, vind, fukt, is, snö och rimfrost). De totala elnät förlusterna i Sverige år 2013 uppgick till 11 TWh, vilket motsvarar 7,4 % av elproduktionen [21]. Majoriteten av elnät förlusterna uppkommer i de lägre spänningsnivåerna, i region- och lokalnät. Elnät förlusterna i stamnätet är mycket mindre (ca 2 %), bl.a. till följd av kraftigt högre spänningsnivå.

Eftersom eltransporten antas ske jämt fördelat över året och anläggningarnas anslutningspunkter i elnätet inte specificerats antas en schablonförlust på 7,4 % utifrån Energimyndighetens siffror.

Kostnaden att transportera el beror bland annat på var i näthierarkin elen ska transporteras; i stamnätet uppgår kostnaden till drygt 25 SEK/MWh enligt Svenska Kraftnät [22]. Kostnaden för att transportera el i regionnäten är högre då den ska täcka kostnaderna i stamnäten, förlusterna i regionnäten samt företagens marginaler. En uppskattning av kostnaden att transportera el i regionnät görs till 60 SEK/MWh med förutsättningen att kostnadsbilden liknar den för stamnätet plus 20 %. Kostnaden för att transportera el i fallstudien ansätts således till 60 SEK/MWh.

4.9.3 Södra anläggningen

Ingen förbränning sker i södra anläggningen. Elen producerad i norra anläggningen mäts vid södra anläggningens grind.

5 Resultatredovisning

Resultatet av beräkningarna presenteras uppdelat på energi respektive transportekonomi. Respektive fall i fallstudien beskrivs i kapitel 4. Indata till förädlingsberäkningarna i norra och södra anläggningen presenteras i tabellform i Bilaga A och indata till transportberäkningarna återfinns i Bilaga B.

5.1 Energi

Det sammanställda resultatet av beräkningarna presenteras i Tabell 8. Resultatet visar att mängden tillgängligt biobränsle minskar med ökad förädlingsgrad i norra anläggningen (Verkningsgrad förädling).

Systemets resulterande mängd el och värme för respektive fall i fallstudien visualiseras i Figur 17. Generellt skiljer inte mängden el netto nämnvärt mellan fallen, däremot är skillnaden större i resulterande värmeproduktion. Mest el netto från systemet fås i fall 7 på 330 GWh, dock ger detta fall ingen värme. Högst totalverkningsgrad och störst värmeproduktion netto fås i fall 1 på 106 % och 770 GWh, främst tack vare rökgaskondenseringen och den höga fukthalten i bränslet.

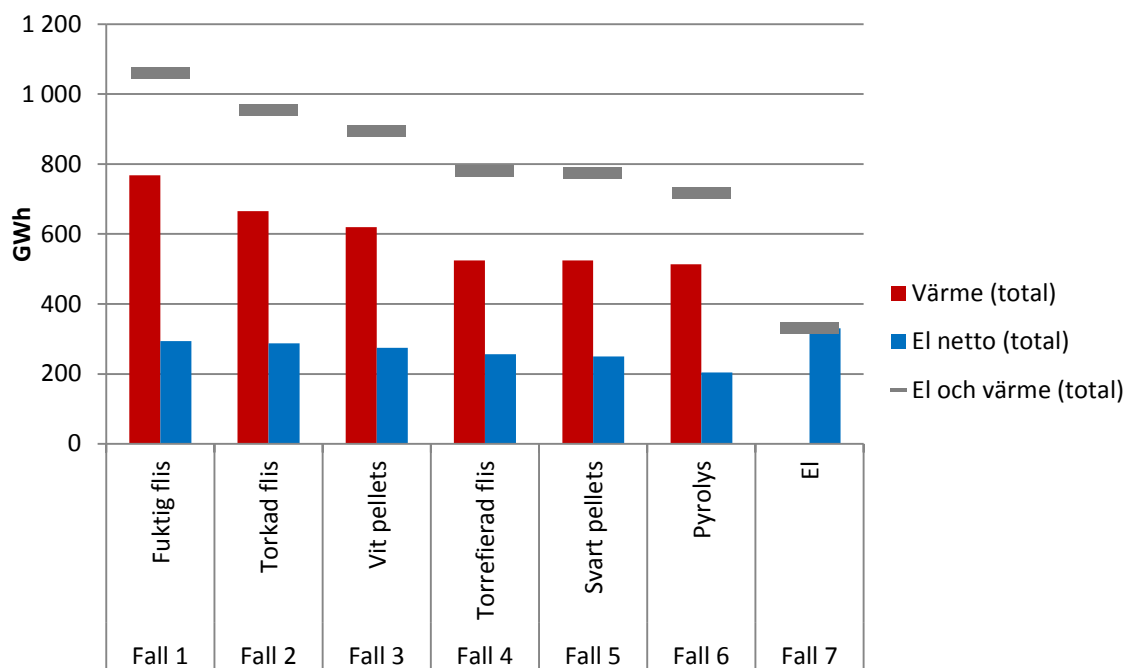
Figur 18 visualiserar energiförbrukningen vid transport. Den största energiförbrukningsposten för fall 1 – 6 är elförbrukning vid tågtransport, högst för fall 1 på ca 15 GWh vilket utgör knappt 75 % av total energiförbrukning. I fall 7 utgörs energiförbrukningen uteslutande av elnätsförluster på dryga 26 GWh, vilket är den högsta totala energiförbrukningen vid transport i studien. Elnätsförlusterna beror på mängden el som transporteras men är procentuellt konstant för alla fall (7,4 %).

Tabell 8. Sammanställning av resultat för energiberäkningar i fallstudien

Table 8. Summary of results for the energy calculations in the case study

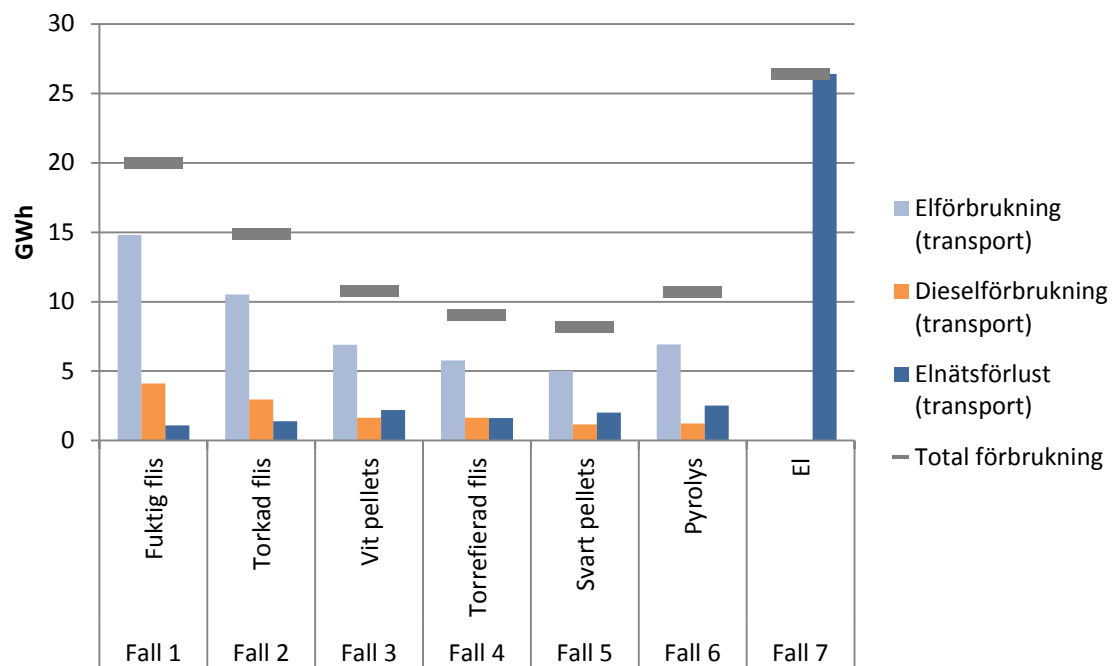
	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 6	Fall 7	
	Fuktig flis	Torkad flis	Vit pellets	Torrefierad flis	Svart pellets	Pyrolys	El	Enhet
Norra anläggningen								
Verkningsgrad förädling (norr) ¹	100%	98%	97%	89%	89%	86%	36%	%
Elförbrukning (norr)	0,0	8,2	22,8	16,3	22,4	44,0	42,0	GWh
Elproduktion (norr)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,9	398,8	GWh
El netto (norr)	0,0	-8,2	-22,8	-16,3	-22,4	-27,1	356,7	GWh
Värmevärde (produkt)	2,42	3,66	4,89	6,18	6,18	4,68	-	MWh/ton
Densitet (produkt)	310	260	625	250	800	1200	-	kg/m ³ ,s
Vikt (produkt)	413793	267161	197259	143374	143374	183123	-	ton/år
Transport								
Elförbrukning (transport)	14,8	10,5	6,9	5,8	5,0	6,9	-	GWh
Dieselförbrukning (transport)	4,1	3,0	1,7	1,6	1,2	1,2	-	GWh
Elnätsförlust (transport)	1,1	1,4	2,2	1,6	2,0	2,5	26,4	GWh
Total förbrukning (transport)	20,0	14,9	10,8	9,0	8,2	10,6	26,4	GWh
Södra anläggningen								
Elförbrukning (söder)	27,5	27,4	27,3	24,9	24,9	21,4	-	GWh
Elproduktion (söder)	337,0	335,2	333,9	304,7	304,7	262,2	-	GWh
El netto (söder)	309,5	307,9	306,6	279,9	279,9	240,8	-	GWh
Värme kondens (söder)	580,0	576,9	574,6	524,5	524,5	451,3	-	GWh
Värme RGK (söder)	187,5	88,5	44,7	0,0	0,0	62,2	-	GWh
Värme netto (söder)	767,5	665,4	619,3	524,5	524,5	513,5	-	GWh
Elverkningsgrad (söder)	31%	32%	32%	32%	32%	28%	-	%
Totalverkningsgrad (söder)	108%	100%	96%	91%	91%	88%	-	%
Netto för systemet								
Värme (total)	767,5	665,4	619,3	524,5	524,5	513,5	-	GWh
El netto (total)	293,6	287,8	274,8	256,2	250,5	204,3	330,3	GWh
Elverkningsgrad (total)	29%	29%	27%	26%	25%	20%	33%	%
Totalverkningsgrad (total)	106%	95%	89%	78%	77%	72%	33%	%

¹ Verkningsgrad förädling definieras som bibränslemängd ut från norra anläggningen genom tillförd bibränslemängd till norra anläggningen. I fall 7 motsvarar det istället elverkningsgraden för kondenskraftverket, mängden el genom tillförd bibränslemängd.



Figur 17. Resultande mängd el och värme netto för systemet

Figure 17. The resulting amount of electricity and heat net for the system



Figur 18. Förbrukning av el och diesel samt elnätsförluster vid transport

Figure 18. Consumption of electricity and diesel, together with losses of electricity, during transport

5.2 Transportekonomi

De totala transportkostnaderna är högst för transport av fuktig flis (fall 1) och blir lägre ju mer förädlad biobränslet är, se Tabell 9 samt Figur 19. För fall 1 blir kostnaderna drygt 90 miljoner per år och för transport av pyrolysslurry (fall 6) blir de drygt 40 miljoner kronor per år. Lägst transportkostnad erhålls vid transport av el (fall 7) på drygt 20 miljoner kronor per år.

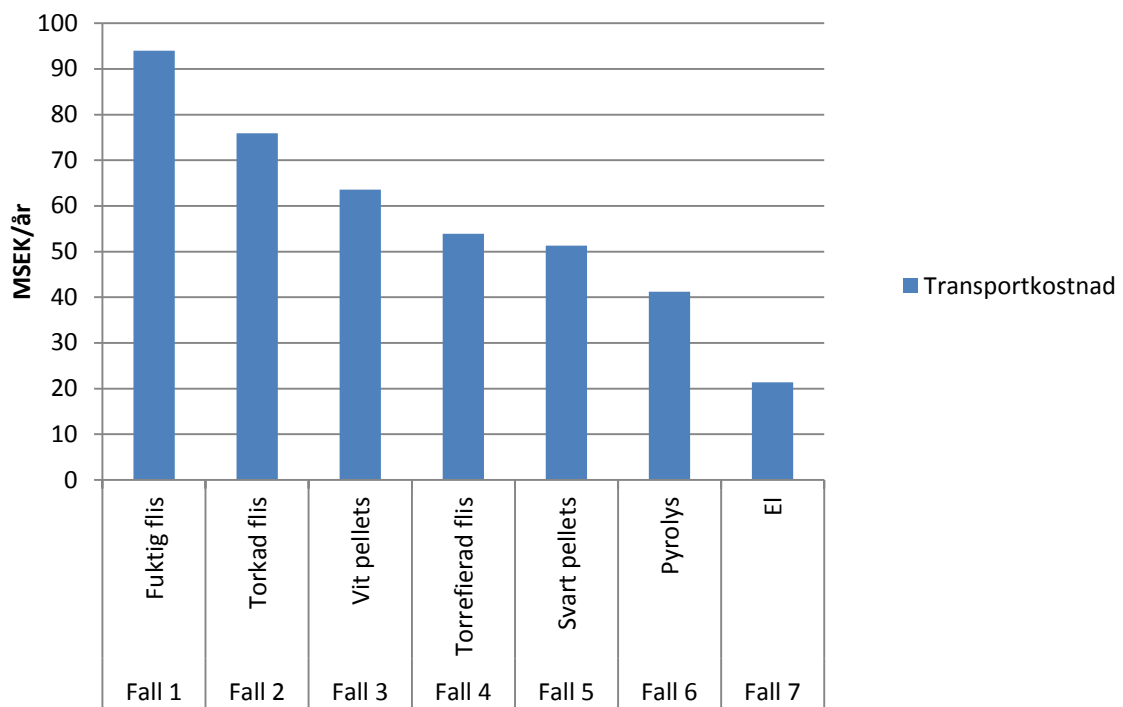
I Figur 20 visas kostnaderna för fall 1-6 uppdelat på aktiviteter som ingår i transporten. För fall 1-3 samt 6 står tågtransporten för den största andelen av kostnaderna. Det är den post som varierar mest mellan de olika fallen. Lastbilstransporten står för en mindre andel av kostnaderna men varierar också relativt mycket mellan fallen. Kostnaderna för lastning samt omlastning varierar däremot mindre mellan de olika fallen; undantaget från detta är fall 6 där kostnaderna för lastning och omlastning är betydligt mindre än för fall 1-5.

I Tabell 9 samt i Figur 21 specificeras kostnaderna för de i tågtransporten ingående delaktiviteterna. Det framgår att kostnader för utrustning (lok, vagnar och lastbärare), personalkostnader, banavgifter, kostnader för underhåll samt kostnader för elektricitet står för ungefär lika stora andelar. Undantaget är fall 6 där transportutrustningen är något dyrare relativt den totala transportkostnaden. Kostnader för växling står för en mindre andel i samtliga fall.

Tabell 9. Sammanställning av resultat för transportkostnadsberäkningar

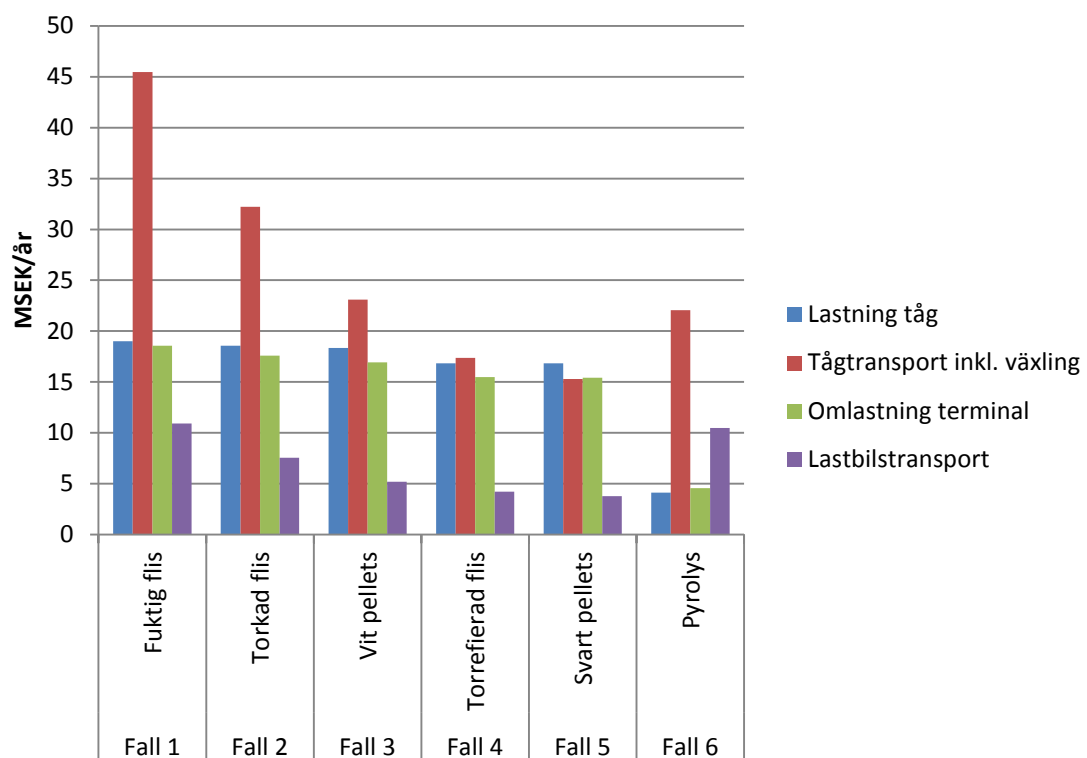
Table 9. Summary of results for the transport cost calculations

	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 6	Fall 7	
	Fuktig flis	Torkad flis	Vit pellets	Torrefierad flis	Svart pellets	Pyrolys	El	Enhet
Totala kostnader								
Total tid per tågomlopp	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	43,1	n/a	h
Omloppstid, multiplar av 12 h	48	48	48	48	48	48	n/a	h
Totala kostnader per år	94	76	64	54	51	41	21	MSEK
Kostnad per aktivitet								
Lastning tåg	19,0	18,6	18,3	16,8	16,8	4,1	n/a	MSEK
Tågtransport inkl. växling	45,5	32,2	23,1	17,4	15,3	22,1	n/a	MSEK
Omlastning terminal	18,6	17,6	16,9	15,5	15,4	4,6	n/a	MSEK
Lastbilstransport	10,9	7,6	5,2	4,2	3,8	10,5	n/a	MSEK
Kostnader tågtransport								
Växling (x2)	2,0	1,4	1,0	0,8	0,7	0,9	n/a	MSEK
Lok, vagnar och lastbärare	9,7	6,8	6,4	3,4	3,2	7,3	n/a	MSEK
Personal	10,0	7,0	4,7	3,8	3,4	4,4	n/a	MSEK
Banavgifter	6,3	4,5	3,0	2,5	2,1	2,7	n/a	MSEK
Underhåll	8,3	6,0	3,9	3,3	2,8	2,6	n/a	MSEK
Elektricitet	9,0	6,4	4,2	3,5	3,1	4,2	n/a	MSEK



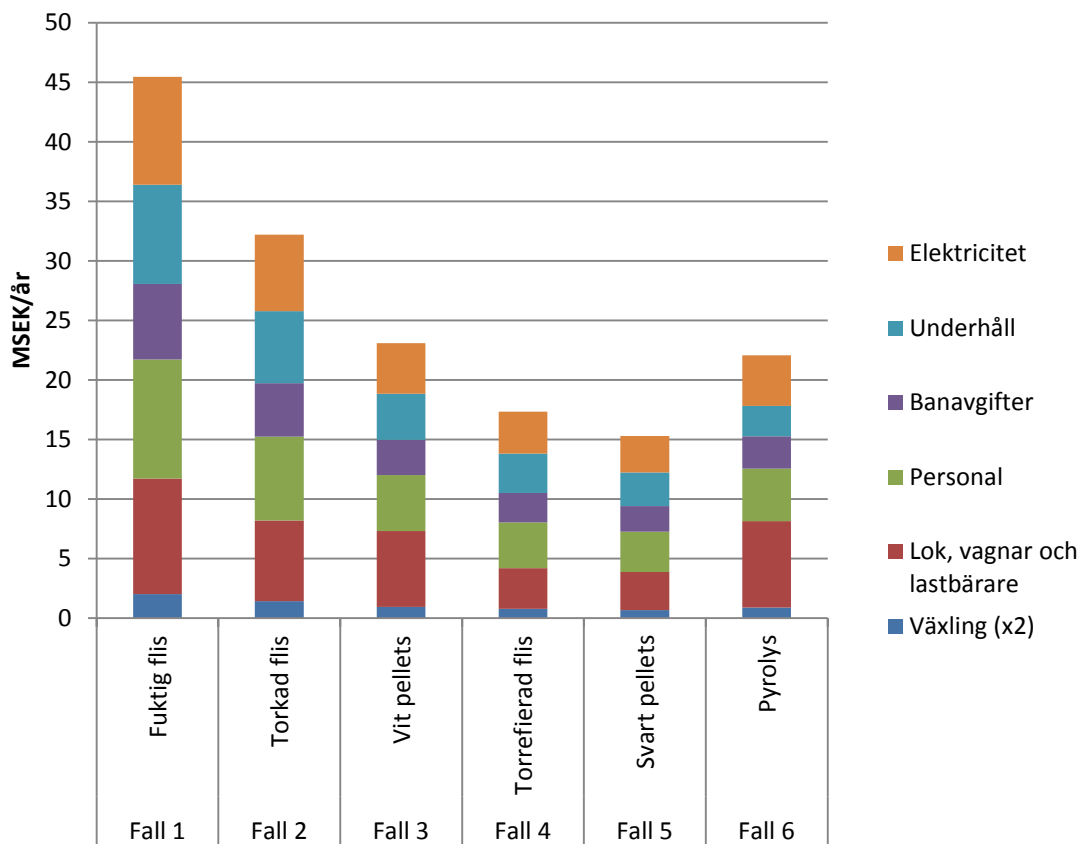
Figur 19. Resulterande transportkostnad

Figure 19. The resulting transportation costs



Figur 20. Transportkostnader uppdelade per aktivitet för fall 1-6

Figure 20. Transportation costs broken down by activity for case 1-6



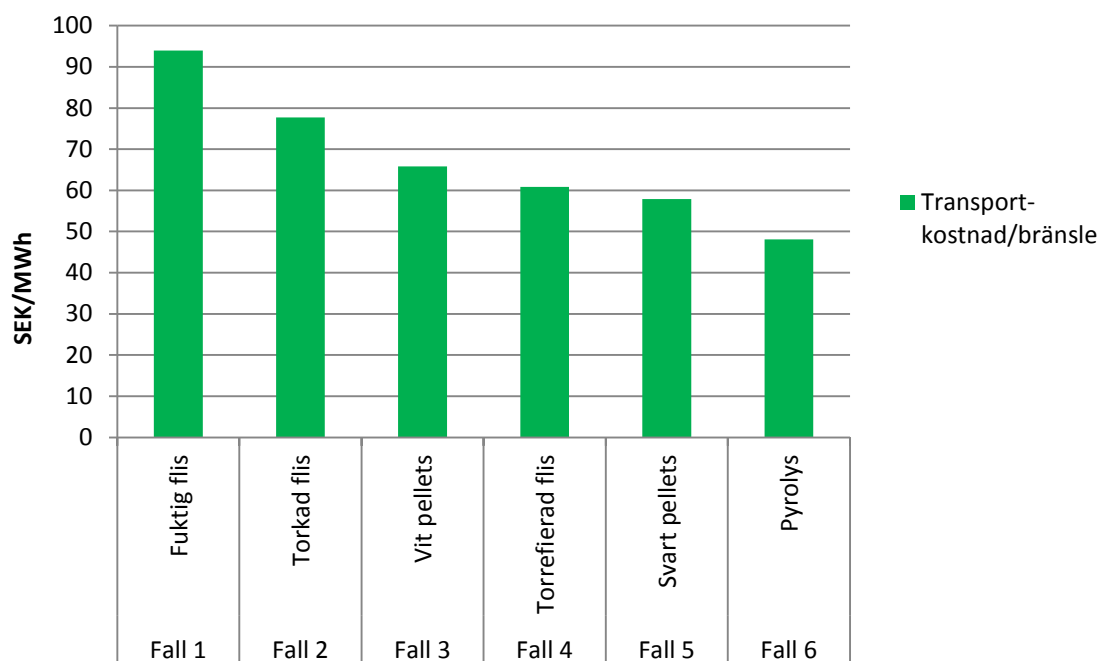
Figur 21. Tågtransportkostnader uppdelade per aktivitet för fall 1-6

Figure 21. Train transportation costs broken down by activity for case 1-6

5.3 Transportkostnader relativt transporterad och producerad energi

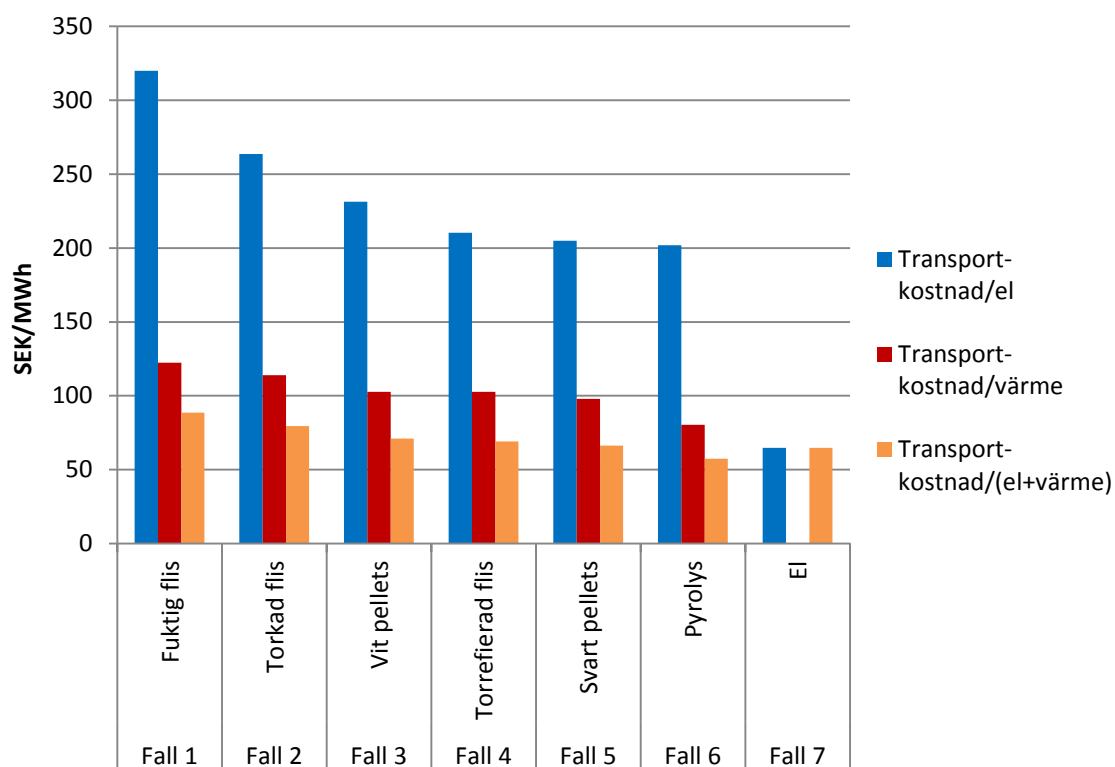
I Figur 22 redovisas transportkostnaderna i förhållande till mängden transporterad bränsle och i Figur 23 i förhållande till producerad mängd el och värme för respektive fall i fallstudien. Lägst transportkostnad per transporterad mängd bränsle, och per producerad mängd värme, fås i fall 6 där flytande pyrolysslurry transporteras och förbränns. Lägst transportkostnad per producerad mängd el netto fås i fall 7 där el produceras i kondenskraftverk och transporteras i kabel.

I Figur 24 redovisas samma resultat som i Figur 22 och Figur 23, fast normerat med fall 1 för att enklare kunna jämföra fallen i fallstudien mellan varandra.



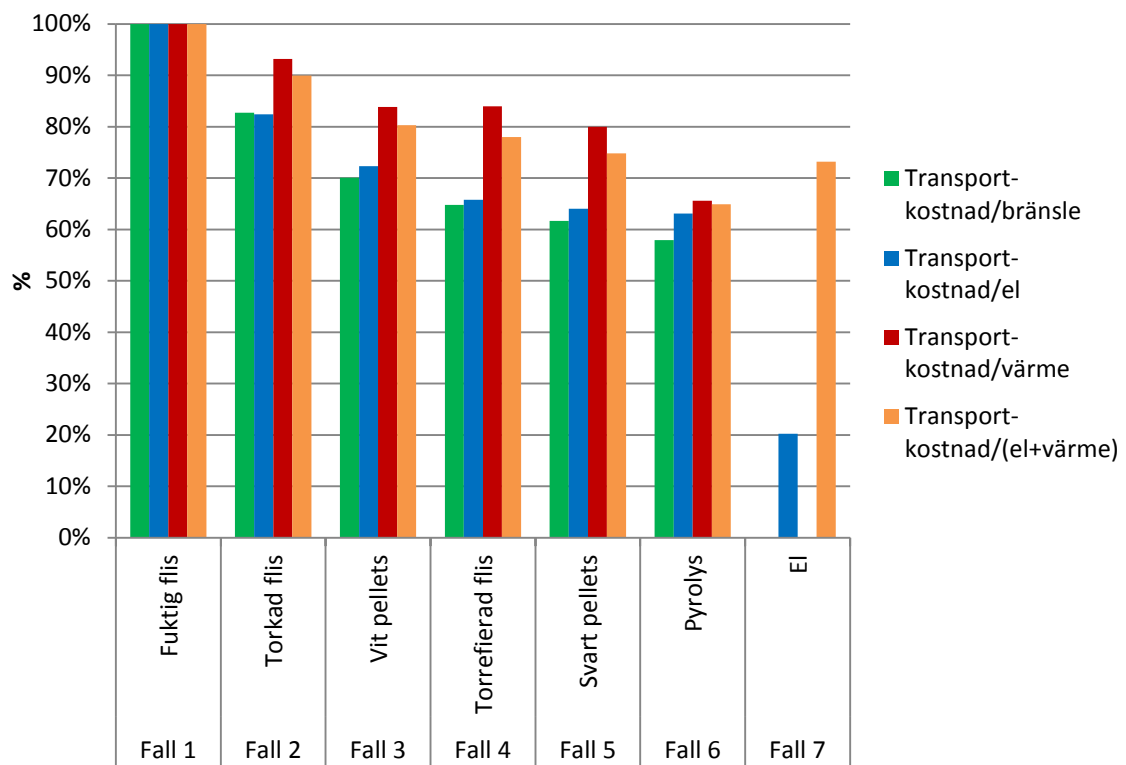
Figur 22. Transportkostnader relativt transporterad mängd bränsle

Figure 22. Transportation costs relative to transported fuel



Figur 23. Transportkostnader relativt producerad mängd el och värme netto

Figure 23. Transportation costs relative to produced net electricity and heat



Figur 24. Transportkostnader relativt producerad mängd el och värme netto, relativt fall 1

Figure 24. Transportation costs relative to produced net electricity and heat, relative to case 1

6 Resultatanalys

Resultatet av den fiktiva fallstudien bygger på optimala förhållanden, konstant bränsleflöde över året, optimerad förädling och förbränning för respektive bränsle samt inkluderar inte lagringsaspekter. Resultatet bör därför i första hand jämföras inom studien och inte direkt med verkligheten. Studien inkluderar endast transportkostnader, produktionskostnader för förädling och lagring ingår alltså inte.

6.1 Förädling leder till minskat el- och värmeutbyte

Resultatet av beräkningarna i Tabell 8 visar att det ur energisynpunkt inte är meningsfullt att förädla flisen innan transport, totala el- och värmeutbytet i systemet minskar med ökad förädlingsgrad. Mängden el netto i systemet skiljer inte nämnvärt mellan fallen generellt, skillnaden visar sig snarare i värmeutbytet. Detta beror främst på fukthalten i bränslet och om anläggningen har rökgaskondensering (RGK) eller inte. I de fall flisen torrefieras är fukthalten för låg för att det ska vara lönsamt att utrusta anläggningen med RGK, vilket kan ses i resultatet (Figur 17) då värmeutbytet är som lägst i förhållande till elutbytet för de fallen. Inte heller pelletering leder till någon energimässig fördel, även om pelletering av torrefierad flis till svart pellets endast minskar totala energiutbytet marginellt. Ingen känslighetsanalys av avståndet har gjorts, men det finns en möjlighet att pelletering av torrefierad flis leder till ökat energiutbyte vid tillräckligt långa transporter.

Det är endast om maximalt elutbyte är av intresse som det ur energisynpunkt lönar sig att förädla flisen, genom produktion av el i kondenskraftverk och transport i kabel (fall 7). Orsaken är att ett kondenskraftverk optimeras för ren elproduktion, vilket ger en betydligt högre elverkningsgrad (36 %) jämfört med ett kraftvärmeverk (31 %) som samtidigt producerar värme. Transport av fuktig flis i fall 1 är energimässigt effektivare än eltransmission i fall 7, men på grund av den högre elproduktionen är elutbytet netto ändå högre för fall 7 än för fall 1.

6.2 Förädling reducerar energiförbrukningen vid transport

Det visar sig (Figur 18) att det är energikrävande att transportera vatten, ju lägre fukthalt i bränslet desto lägre är energiförbrukningen vid transport. Den totala energiförbrukningen mer än halveras vid transport av torrefierad flis jämfört med fuktig flis. Störst energiförbrukning sker vid transport av el i form av elnät förluster, i studien uppskattade till 7,4 %.

Pelletering av torkad flis till vit pellets minskar energiförbrukningen vid transport med knappt 30 %. Det beror huvudsakligen på att vikten är lägre på grund av lägre fukthalt i pelletsen, men också på grund av ökad densitet. Att pelletera torrefierad flis till svart pellets minskar endast energiförbrukningen med knappt 10 %. Det beror främst på att vikten förblir oförändrad då fukthalten för torrefierad flis är nära noll.

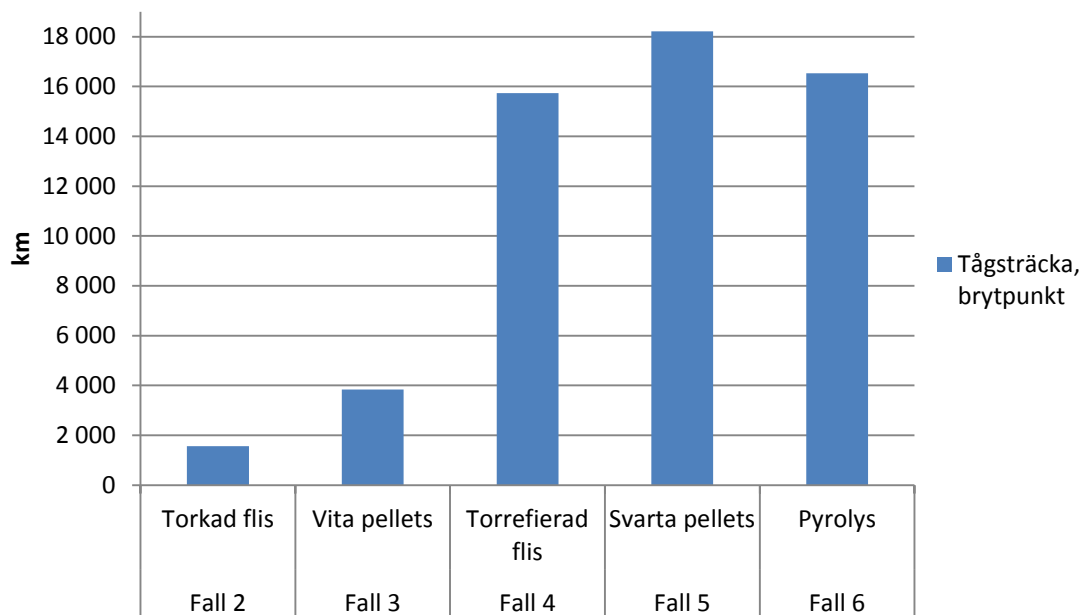
Den största andelen av energiförlusterna vid transport (Figur 18) består av elförbrukning, vilket innebär att det är den långväga tågtransporten som står för den största energiåtgången. Storleken av denna beror på hur många tåglopp som krävs per år för att transportera allt biobränsle. Det är den totala vikten av gods och tågagnar som i samtliga fall är begränsande för hur mycket bränsle som ryms i varje tågtransport.

Sändningsstorleken varierar något mellan de olika fallen men ligger mellan drygt 800 och drygt 900 ton bränsle per tågomlopp, beroende på varierande densitet. Däremot varierar den totala mängden bränsle i ton över hela året starkt mellan fallen, från 143 000 ton per år för torrefierade biobränslen (fall 4-5) till 414 000 ton för fuktig flis (fall 1). Det innebär att antalet tågomlopp som krävs varierar mellan drygt 150 per år (fall 5) upp till drygt 460 (fall 1) och det är främst detta som driver energiåtgången per fall. Vid transport av pyrolysslurry (fall 6) krävs dessutom att bränslet varmhålls under transport vilket ökar elförbrukningen under tågtransporten.

Det ska understrykas att lagringsaspekter inte beaktats i studien, så eventuell energiförbrukning för ventilation, varmhållning etc. vid lagring fångas inte upp i resultaten.

6.3 Långa transportsträckor krävs för att uppväga förädlingsförluster

Resultatanalys visar att det krävs längre transportsträckor än antaget i denna studie för att de energiförluster som uppstår vid förädling ska understiga transportförlusterna. I Figur 25 visas den tågsträcka som krävs för att förädlingsförlusterna ska tangera transportförlusterna; från knappt 200 mil för torkad flis till 1800 mil för svart pellets. Om hänsyn enbart tas till dessa energiaspekter lönar det sig inte att förädla och transportera bränsle inom Sverige, oavsett förädlingsteknik. Läget skulle för merparten av fallen bli ett annat om förädlingsanläggningarna förläggs där restvärme finns tillgängligt.



Figur 25. Transportsträcka som krävs för att förädlingsförlusterna ska vara lika stora som transportsförlusterna

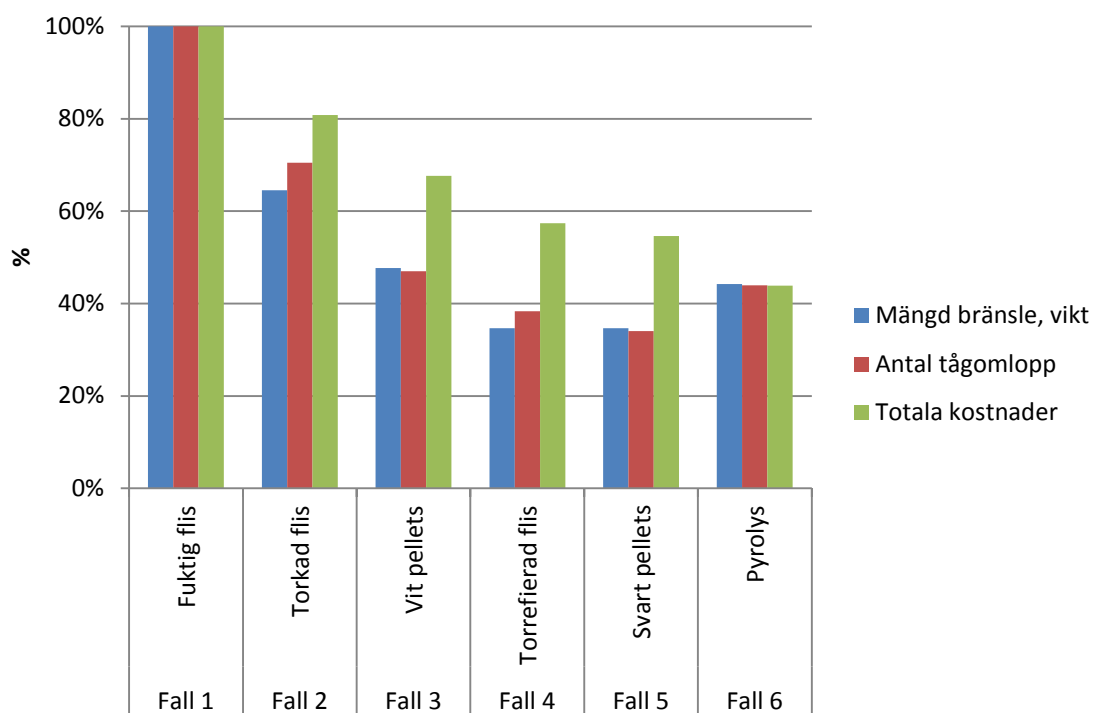
Figure 25. Transportation distance required for the processing losses to be equal to the transportation losses

6.4 Transportkostnaderna minskar med ökad förädlingsgrad

Av Figur 19 framgår att transportkostnaderna sjunker med ökad förädlingsgrad. Anledningen till detta, för fall 1-5, är framförallt att det blir en mindre mängd bränsle (mätt i ton) som ska transporteras från norra till södra anläggningen. Eftersom bränslena i fall 1-5 transporteras likadant (fast bulkgoods) är det endast skillnader i mängd och densitet mellan fallen som ger skillnader i transportkostnaderna. I fall 6 är det istället flytande bulkgoods som skall transporteras vilket ger en något annorlunda kostnadsstruktur. Detta gör att transport av pyrolysslurry (fall 6) har de lägsta transportkostnaderna, trots att mängden gods (mätt i ton) är större än för fall 4 och 5.

I Figur 20 framgår det att det främst är kostnaderna för långväga tågtransport som ger upphov till skillnader i transportkostnaderna för fall 1-5. Det beror på att antalet tågomlopp som krävs för att transportera den totala bränslemängden på ett år ökar med ökad mängd bränsle mätt i ton. För fall 1-5 är det den totala vikten av gods samt vagnar och lastbärare per tåg som begränsar sändningsstorleken. För bränslesorterna med högst densitet (vit pellets och svart pellets) kan tågagnarna inte lastas helt fulla eftersom de då skulle bli för tunga för tågrälsen. Antalet vagnar i tåget blir också lägre för dessa bränslen än för övriga fasta bränslen, men sändningsstorleken i ton blir ändå relativt jämn för fall 1-5; mellan 810 och 908 ton bränsle per tågomlopp.

Ovanstående resonemang illustreras av Figur 26, där den årliga transportvolymen i ton, antalet tågomlopp samt de totala transportkostnaderna jämförs mellan fall 1-6, relativt fall 1. Att de totala kostnaderna varierar mindre än övriga storheter mellan fall 1-5 beror på att lastnings- och omlasningskostnader varierar mindre mellan fallen än själva transportkostnaderna (se vidare resonemang kring lastnings- och omlasningskostnader nedan).



Figur 26. Jämförelse av mängd bränsle i vikt, antal tågomlopp och totala transportkostnader mellan fall 1-6, relativt fall 1

Figure 26. Comparison of yearly goods flow in tons, number of railway roundtrips and total transport costs in cases 1-6, relative to case 1

Samma resonemang gäller lastbilstransporterna för fall 1-5; ju mer bränsle som transporteras per år mätt i ton, ju högre lastbilstransportkostnader. Lastbilstransporten utgör en mindre andel av de totala kostnaderna än järnvägstransporten, men står också för en betydligt mindre transportsträcka. Om kostnaderna för lastbils- respektive järnvägstransporten slås ut på transportsträcka ser man att kilometerkostnaderna för lastbilstransporten är cirka 10 gånger högre än för järnvägstransporten (gäller fall 1-5, för fall 6 blir skillnaden ännu större).

Transport av pyrolysslurry (fall 6) skiljer sig från övriga fall genom den höga densiteten och genom att annan sorts transportutrustning krävs på grund av att bränslet är i flytande form. Trots att en annan sorts tågvagnar används i detta fall hamnar den totala sändningsstorleken per tågomlopp i samma storleksordning som för det fasta bulkgodset (900 ton/omlopp). Det som framför allt skiljer totalkostnaderna för transport av pyrolysslurry från de övriga fallen är de lägre omlastningskostnaderna. Det beror på att slurryn pumpas mellan tågvagnar och cistern samt mellan cistern och tankbil. Visserligen förutsätts att detta är föknippat med en avgift och att personal behöver vara närvarande under tiden, men kostnaderna blir ändå betydligt lägre än hanteringen av flis eller pellets med lastmaskiner och specialtruckar.

Viktigt att påminna om i sammanhanget är att lagringskostnader inte inkluderats i analysen. Dessa är antagligen betydligt högre för pyrolysslurry (i form av cisternhyra i oljehamn eller specialterminal) än för flis och pellets. Vidare är hanteringen av

pyrolysslurry förknippad med vissa speciella krav och säkerhetsrisker (se kapitel 3.2), vilket gör att investeringar kan krävas i terminalutrustning och -utformning. Det innebär också att antalet möjliga omlastningspunkter för pyrolysslurry antagligen är begränsade, eller att kostnader tillkommer för att göra nämnda investeringar. Kostnadsuppskattningen för fallet med pyrolysslurry bör därför ses som underskattat i förhållande till de andra fallen. Lastbilskostnaderna är relativt höga för pyrolystransporten då en tankbil är dyrare än en flisbil samt att lastning och lossning av bilen tar betydligt längre tid när det är slurry som ska pumpas in i och ut ur bilen, till skillnad från när en lastmaskin skopar flis eller pellets upp på en flisbil som sedan kan tippa ut lasten vid ankomst.

Slutligen bör kostnadsuppskattningarna för lastning och omlastning av flis och pellets sättas i ett sammanhang. Terminalkostnader varierar starkt i verkligheten beroende på förutsättningarna i varje enskilt fall och det finns ytterst lite underlag att bygga bedömningen på. Uppskattningarna som gjorts här baseras på underlag från en beräkningsmodell framtagen vid Handelshögskolan vid Göteborgs Universitet [18]. I den modellen, och i branschen generellt, anges kostnader för terminalhantering i kronor per MWh bränsle. Mängden bränsle mätt i MWh varierar mycket mindre mellan fall 1-5 än vad mängden bränsle mätt i ton gör, varför även kostnaderna för lastning och omlastning blir relativt lika. Det har inte inom projektets ramar ingått att anpassa dessa kostnadssamband med hänsyn till varierande energiinnehåll och densitet för de olika bränslena. Vidare är kostnaderna i den underliggande modellen angivna för olika typer av omlastningar, av vilka de mest lämpade valts ut för hanteringen i den norra anläggningen samt i terminalen i anslutning till den södra anläggningen. Vid den norra anläggningen ingår i denna studie endast att bränslet lastas från marken upp på tåget med hjälp av en lastmaskin, och det är även utifrån det som energiåtgången beräknats. Kostnadsuppskattningen inkluderar dock även viss föregående hantering (avlastning av bränsle från lastbil samt stackning/transport inom terminalområdet). Detta gör att kostnaderna för lastning av tåg antagligen är överskattade i resultaten, relativt andra kostnader.

6.5 Lägst transportkostnader per energienhet beror på efterfrågad energiform

Intressanta nyckeltal att analysera är transportkostnader relativt transporterad mängd biobränsle samt relativt producerad mängd el och värme i systemet.

Vilket fall i fallstudien som leder till lägst transportkostnad per energienhet beror på efterfrågad energiform. Om endast el är av intresse är eltransport i fall 7 det överlägset billigaste sättet att transportera bioenergi, dock produceras ingen värme. Kostnaden att transportera el är uppskattad till 60 SEK/MWh_{el} (se avsnitt 4.9.2) vilket med en generell elnätsförlust om 7,4 % leder till knappt 65 SEK/MWh_{el}. Detta kan jämföras med fall 1 där transportkostnaden per producerad mängd el beräknats till 320 SEK/MWh, men där också värme producerats.

För övriga energiformer (bränsle och värme) leder transport av pyrolysslurry (fall 6) till lägst transportkostnad per energienhet. I Figur 22 ses ett tydligt samband där transportkostnaderna relativt transporterad mängd biobränsle minskar vid ökad

förädlingsgrad och där pyrolys leder till lägst transportkostnad per transporterad mängd biobränsle (48 SEK/MWh_{bränsle}), följt av svart pellets och torrefierad flis.

Förklaringarna till detta är flera. Exempelvis beror skillnaden mellan fall 4 och fall 5 på den stora densitetsskillnaden mellan fallen (250 kg/m³ i fall 4, 800 kg/m³ i fall 5). För svart pellets (fall 5) blir sändningsstorleken per tåg drygt 900 ton jämfört med drygt 800 ton för torrefierad flis (fall 4), vilket ger drygt 10 % färre tågomlopp per år som i sin tur gör att fall 5 får något lägre transportkostnader än fall 4. Liknande effekter uppstår för lastbilstransporten, lastnings- och omlastningskostnader är dock i princip desamma i fall 4 och 5. För fall 6 är förklaringen att transport av pyrolysslurry innebär en lägre total transportkostnad då slurryn är pumpbar; lastning och lossning är mycket billigare.

Det bör beaktas att transport av pyrolysslurry (fall 6) är förknippat med störst osäkerheter i studien då ytterst få långväga transporter av pyrolysslurry förekommer. Samtidigt stöds resultatet av Benjaminsson et.al [1] som presenterar att transport av pyrolysolja är billigare än både flis- och pelletstransport, inklusive terminalkostnader.

6.6 Fartygstransport är billigare men mer energikrävande

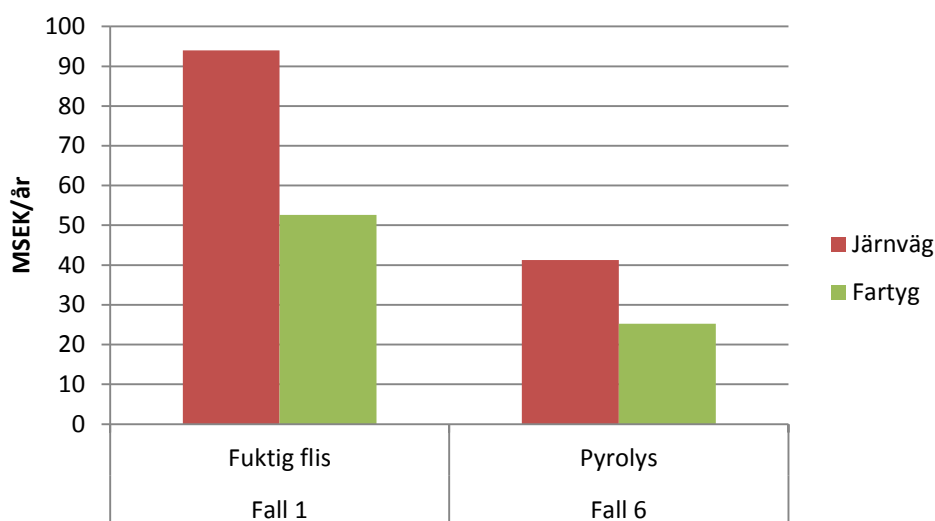
En förenklad känslighetsanalys har utförts för två fall där järnvägstransport ersatts med fartygstransport, beskrivet i avsnitt 4.1.2.1. Beräkningar har gjorts för transport av fuktig flis i form av fast bulkgoods (fall 1) och transport av pyrolysslurry i form av flytande bulkgoods (fall 6).

Känslighetsanalysen utgår från bränslemängderna i huvudanalysen och med en sändningsstorlek för fartyget på 3 500 ton leder det till 118 fartygsomlopp för fall 1 och 52 fartygsomlopp för fall 6. En medelhastighet av 15 knop ger en total omloppstid på knappt tre dygn, inklusive lastning och lossning, vilket i praktiken skulle innebära att fartyget i fall 1 precis hinner frakta allt bränsle under ett år om det går i skytteltrafik.

Totalkostnaderna, inklusive lastning, lossning och lastbilstransport, visualiseras i Figur 27. För endast den långväga transporten utgör fartygstransport (exkl. lastbilstransport) i bägge fallen cirka 45 % av kostnaden för järnvägstransport med de förutsättningar som beskrivits i avsnitt 4.1.2.1.⁴ När lastbilskostnaderna⁵ läggs till blir totalkostnaderna för fartygsalternativet ungefär 55 % av kostnaderna för järnvägsalternativet i fall 1 och 60 % i fall 6. Observera att detta är förutsatt att den södra anläggningen har egen kaj så lossning av fartyget sker direkt på anläggningen (förutsättningarna beskrivs i avsnitt 4.1.2.1).

⁴ Anledningen till att resultatet blir samma för de båda fallen är att kostnadsdata i underlaget är angivet för ett antal typfordon, och i både fall 1 och fall 6 används samma typfordon (se bilaga B).

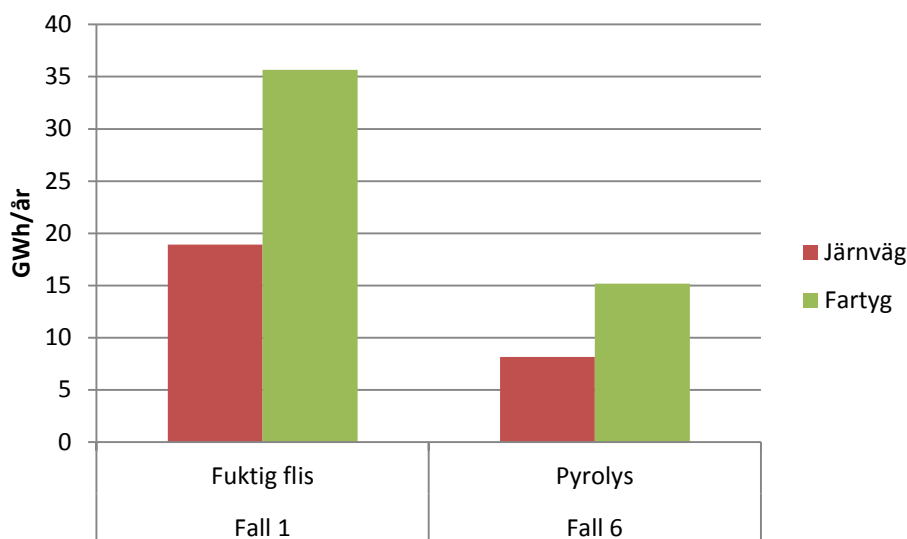
⁵ "Lastbilskostnaderna" motsvarar här resultaten i huvudanalysen för lastbilstransport samt 50 % av kostnaderna för omlastningen på terminal, i respektive fall.



Figur 27. Totalkostnader per år för fartygsalternativet jämfört med järnvägsalternativet

Figure 27. Total yearly costs for the sea transport option compared to the railway transport chain

Totala energiåtgången blir å andra sidan högre för fartygsalternativet i både fall 1 och 6, visualiserat i Figur 28. Det fartyg i NTM:s beräkningsförutsättningar som passar bäst in i studien är ett 2 852 dwt torrbulksfartyg [20]. Energiförbrukningen per kilometer för fartyget har räknats upp för att motsvara samma fartyg som använts till kostnadsberäkningarna, vilket ger en energiförbrukning för endast fartygstransporten på ca 32 GWh per år för fall 1 respektive ca 10 GWh per år för fall 6. Detta kan jämföras med tågtransportens knappt 15 GWh per år för fall 1 respektive 7 GWh per år för fall 6, det vill säga att fartygsalternativet energiåtgång utgör cirka 210 % respektive 200 % av järnvägsalternativets energiåtgång. Om även energiåtgång för lastning, lossning och lastbilstransport inkluderas blir energiåtgången för fartygsalternativet jämfört med järnvägsalternativet cirka 190 % (fall 1) respektive 185 % (fall 6), se Figur 28.



Figur 28. Total energiåtgång per år för fartygsalternativet jämfört med järnvägsalternativet

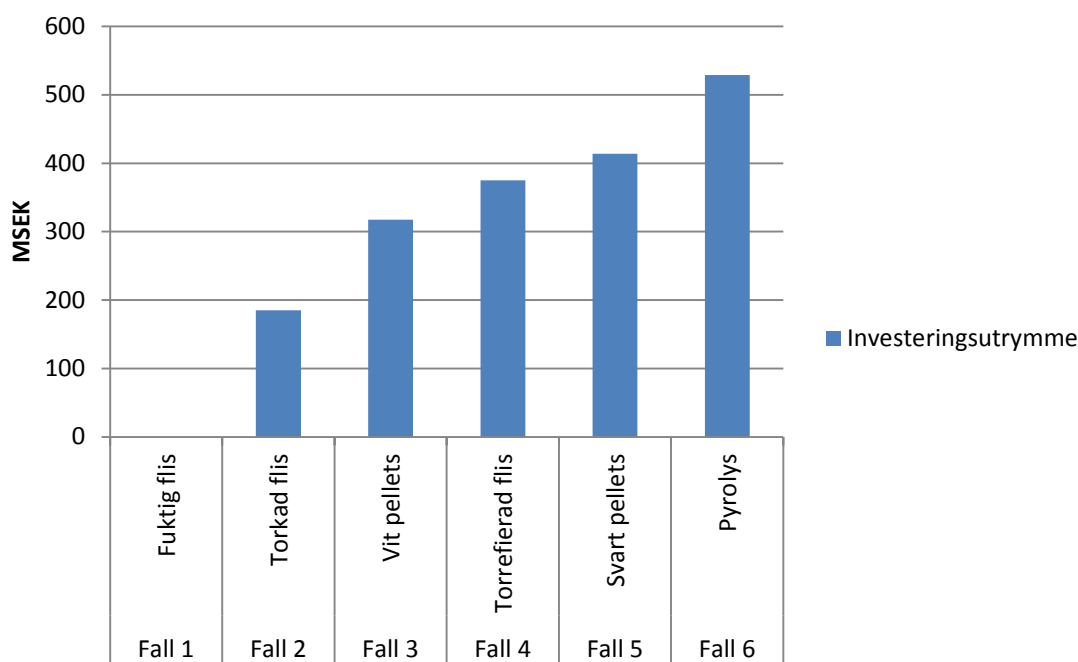
Figure 28. Total yearly energy consumption for the sea transport option compared to the railway transport chain

Det bör påpekas att energiberäkningen för fartygsalternativet är grov och resultatet bör tolkas som att energiåtgången för fartygstransport verkar vara betydligt högre (ungefär dubbelt så stor) än för järnvägsalternativet. Dessutom utgörs energiförbrukningen vid långväga fartygstransport (exklusive lastning, lossning och lastbilstransport) uteslutande av fartygsbränsle och vid järnvägstransport uteslutande av el, vilket egentligen inte kan jämföras rakt av.

Skillnaderna mellan fallen beror, liksom i huvudanalysen, främst på skillnaden i transporterad mängd gods mätt i ton och därmed antal omlopp per år; både för kostnader och energiåtgång. Anledningen till att energiåtgången för fartygsalternativet blir så pass hög är antagligen att ett relativt litet fartyg används. För längre transportsträckor (mellan kontinenter) används större fartyg varför energiåtgången per transporterat ton blir betydligt lägre. Förutom skillnader i kostnader och energiåtgång innebär fartygstransport att andra förutsättningar på den södra anläggningen krävs. Dels förutsätts i denna analys tillgång till egen kaj för att undvika ytterligare en omlastning som driver kostnader. Vidare förutsätts att det finns utrymme vid den södra anläggningen att ta emot 3 500 ton bränsle på en gång (vilket för fall 1 motsvarar mer än 11 000 m³), medan det i järnvägsalternativet delas upp i mindre sändningar.

6.7 Minskade transportkostnader ger ökat investeringsutrymme

Med de förutsättningar som använts i denna studie påvisas en minskad årlig transportkostnad på ca 20-70 MSEK beroende på fall, där ökad förädlingsgrad generellt ger en större transportkostnadsbesparing. Denna besparing skulle kunna användas för investering i förädlingsanläggningen i norr. Med de transportkostnader som presenteras i tabell 9, en avskrivningstid på 20 år och en kalkylränta på 6 % beräknas ett investeringsutrymme genom en nuvärdesanalys, redovisat i Figur 29.



Figur 29. Nuvärdesberäknat investeringsutrymme p.g.a minskade transportkostnader (bränslemängd 1000 GWh, avskrivningstid 20 år, kalkylränta 6 %)

Figure 29. Present value for investment capacity due to reduced transportation costs (fuel 1000 GWh, depreciation period 20 years, discount rate 6 %)

Investeringskostnaden för den nya pelletsfabriken i Uddevalla, med en kapacitet på 80 000 ton vit pellets/år, uppgår till 225 MSEK [23]. Med en skalfaktor på 0,45 [24] för investeringen skulle en motsvarande anläggning för 1 000 GWh pellets kosta 385 MSEK, vilket är mer än investeringsutrymmet för fall 3 enligt Figur 29.

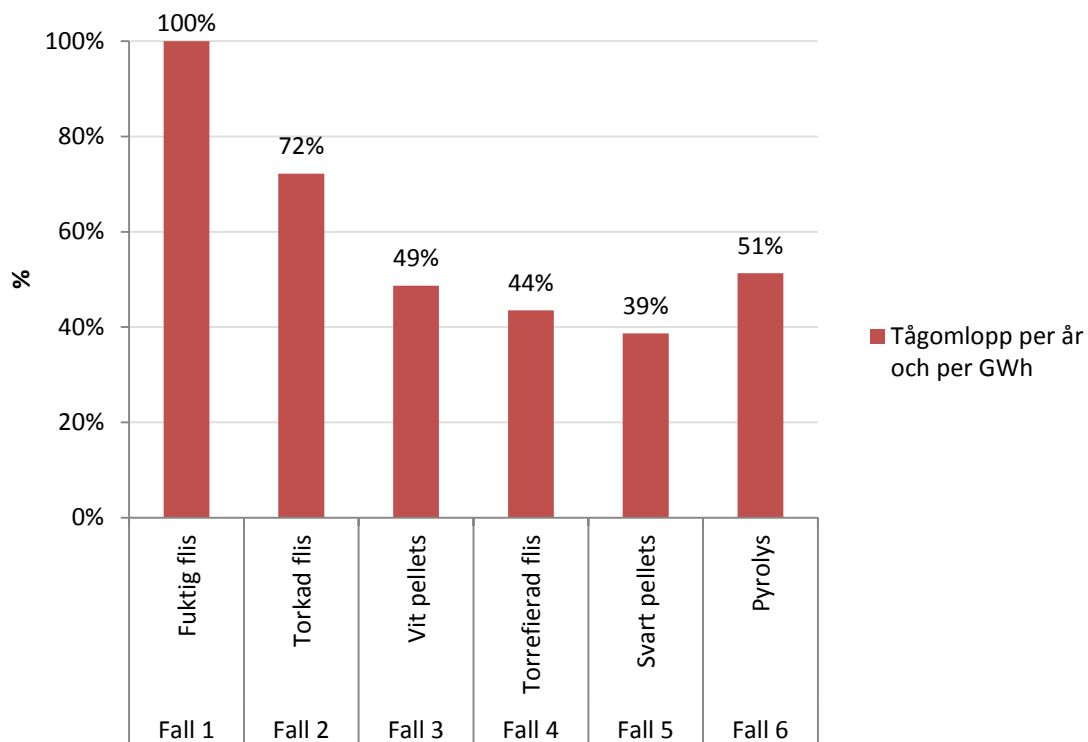
Liknande jämförelse kan göras med fall 6, pyrolys. Pyrolysanläggningen i Joensuu med en produktionskapacitet på knappt 30 MW pyrolysolja har kostat ca 300 MSEK. Uppräknat till 1000 GWh pyrolysslurry och med en skalfaktor på 0,65 [24] skulle investeringskostnaden bli 685 MSEK vilket liksom för pelletsfallet är mer än vad investeringsutrymmet på grund av minskade transportkostnader beräknats till.

Resultaten pekar på att den eventuella lönsamheten i förädlingen inte enbart kan härröra från lägre transportkostnader; ett ökat värde i själva bränslet måste till vilket kräver att det förädlade bränslet tillför en nytta som fuktig flis inte gör. Exempelvis kan lagringsaspekter eller anläggningsspecifika förutsättningar vara av betydelse som gör att ett förädlad biobränsle är av högre värde. Detta har dock inte analyserats i denna studie.

6.8 Förädling leder till minskad belastning på järnvägsnätet

Antalet tågomlopp minskar med ökad förädlingsgrad vilket beskrivs i avsnitt 0 där jämförelse med referensfallet (fall 1, transport av 1000 GWh fuktig flis) görs i Figur 30. Det beror delvis på att den transporterade vikten minskar i och med att massförluster sker vid förädlingen, vilket leder till färre transporter, men också på att energidensiteten ökar. I Figur 30 visas den procentuella skillnaden i antal tågomlopp för de olika fallen men där

samma energimängd transporteras till södra anläggningen. Antalet tågomlopp per transporterad energienhet minskar således med ökad förädlingsgrad. För transport av exempelvis svart pellets (fall 5) minskar antalet tågomlopp med ca 60 % och för både vit pellets (fall 3) och pyrolysslurry (fall 6) minskar antalet med ca 50 %. Förädling leder följaktligen till minskad belastning på järnvägsnätet.



Figur 30. Antal tågomlopp per år och per GWh biobränsle, relativt fall 1

Figure 30. Number of trains per year and per GWh biofuel, relative to case 1

7 Slutsatser

Studien visar att det inte lönar sig att förädla biobränsle enbart baserat på att transporten blir effektivare; energiförlusten vid förädling är större än den minskade energiförbrukningen vid transport av förädlad biobränsle. Studien visar dock att det är ekonomiskt lönsamt ur transportsynpunkt att förädla biobränsle innan långväga transport. Dessutom minskar antalet tågomlopp för bränsleförsörjning vilket kan minska belastningen på järnvägssystemet.

Om hög totalverkningsgrad är målet ska biobränslet inte förädlas, högst sammanlagd värme- och elproduktion på systembasis på givet bränsleunderlag ges genom förbränning av fuktig flis. Om endast el beaktas är det mest gynnsamt att producera el i kondenskraftverk i norr, all annan förädling leder till minskat el- och värmeutbyte i jämförelse med att inte förädla biobränslet innan transport. Däremot minskar transportkostnaderna vid all sorts förädling och är som lägst för pyrolys och elproduktion i kondenskraftverk. Vilken förädlingsform som är mest lämplig beror på vilken energiform som efterfrågas samt vilka typer av transport- och förbränningsförutsättningar⁶ som föreligger.

Pelletering av torrefierad flis till svart pellets minskar transportkostnaderna marginellt och kommer troligtvis inte vara lönsamt vid en analys av samtliga kostnader för förädling, lagring och transport, åtminstone inte för transporter inom Sverige. Däremot finns potential till bibehållet nettoenergiutbyte vid långväga transporter, trots vidare förädling, på grund av stor densitetsökning och minskad energiåtgång vid transport.

Det är främst vikten biobränsle som styr kostnader och energiåtgång för transporten; ju mer vikt som kan elimineras per energienhet, desto billigare och energisnålare transport.

Biobränslen i flytande form är billigare och mindre energikrävande att hantera vid lastning/lossning jämfört med fasta biobränslen som flis och pellets, med reservation för tillkommande kostnader för lagring, hantering av säkerhetsrisker etc.

Om långväga järnvägstransport byts ut mot fartygstransport⁷ minskar de totala transportkostnaderna i studien med 40 – 50 %, samtidigt som energiförbrukningen i princip fördubblas.

⁶ Exempelvis förutsätter förbränning av pyrolysslurry en oljepanna och kan därför inte direkt ersättas/jämföras med fuktig flis som istället förbränns i en fastbränslepanna, däremot kan bland annat torkad flis jämföras med fuktig flis.

⁷ Förutsatt att mottagande anläggning har egen kaj för lossning av fartyg

8 Rekommendationer och användning

Studien består av en fiktiv fallstudie vilket gör att de faktiska resultatsiffrorna bör jämföras inom studien och inte direkt med verkligheten, även om en del av indata till fallstudien är baserad på faktiska anläggningar och transporter. Ett flertal antaganden har gjorts för att lättare kunna jämföra de olika fallen i fallstudien men som inte stämmer överens med alla kraftvärmeanläggningars verklighet. Exempelvis har konstant bränsleflöde antagits över året, i verkligheten varierar i de flesta fall bränsleflödet beroende på efterfrågan på värme över året. Slutsatserna i rapporten är dock representativa för vad som kan anses vara effektiv transport av bioenergi i Sverige.

Om målet är att maximera resursutnyttjandet bör ingen förädling av biobränsle ske före långväga transport. Förädling leder till större energiförlust i systemet i förhållande till den minskning av energiförbrukning vid transport som förädlingen syftar till. Undantaget är när endast el är av intresse som det ur resurssynpunkt kan vara värdefullt att förädla biobränsle före långväga transport, då i form av elproduktion i kondenskraftverk och transport av el i kabel.

Som komplement till rapporten finns en enkel beräkningsapplikation i Excel-format med möjlighet att utföra beräkningar utifrån den egna anläggningens förutsättningar. I bilaga återfinns indata som använts vid beräkningarna i rapporten, samma indata återfinns i beräkningsapplikationen med vissa möjligheter till modifiering.

9 Förslag till fortsatt forskningsarbete

Studien omfattar inte kostnader för förädling eller lagring av biobränsle utan omfattar endast transportkostnader. Ett förslag på fortsatt forskningsarbete är att komplettera studien med en analys av övriga kostnader i systemet för att räkna fram den totalt sett mest ekonomiskt fördelaktiga förädlingsmetoden av bioenergi. Det är inte nödvändigtvis så att den energimässigt mest effektiva transporten av bioenergi också är den mest ekonomiskt gynnsamma.

Fallstudien är upplagd så att anläggningarna har en jämn last över året. Detta är förvisso sant för en del anläggningar som utgör baslast i fjärrvärmesystemet men merparten har varierad last och varierad andel rökgaskondensering över året och driftsäsongen sträcker sig generellt från september/ oktober till april/ maj. För de mest intressanta förädlingsmetoderna kan modeller baserade på ett mer klassiskt varaktighetsdiagram tas fram för ytterligare verklighetsanpassning.

I dagsläget avverkas mindre skog än tillväxten i Sverige vilket gör att lättillgängliga trädprodukter kommer finnas i större utsträckning framöver och att det således blir mindre värt att förädla för inhemskt bruk. Samtidigt ökar möjligheterna för export till andra länder. Potential och optimal förädling för export kan analyseras utifrån resultatet av denna studie.

10 Litteraturförteckning

- [1] G. Benjaminsson, J. Benjaminsson och N. Bengtsson, "Decentraliserad produktion av pyrolysolja för transport till storskaliga kraftvärmeverk och förgasningsanläggningar," Gasefuels AB, Stockholm, 2013.
- [2] M. Frosch och P. Thorén, "Järnvägstransport av biobränslen," Värmeforskrapport 1138, Värmeforsk, Stockholm, 2011.
- [3] G. Forsberg, "Biomass energy transport - Analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method," *Biomass and Bioenergy*, nr 19, pp. 17-30, 2000.
- [4] M. Svanberg, I. Olofsson, J. Flodén och A. Nordin, "Analysing biomass torrefaction supply chain costs," *Bioresource Technology*, nr 142, pp. 287-296, 2013.
- [5] IEA Bioenergy Task 40, "Low cost, long distance biomass supply chains," IEA, 2013.
- [6] I. Nohlgren, S. Herstad-Svärd, M. Jansson och J. Rodin, "El från nya och framtida anläggningar 2014," Elforskrapport 14:40, Elforsk, Stockholm, 2013.
- [7] J. Rodin och O. Wennberg, "Förgasning för bränsleproduktion i stor- och småskaliga energikombinat," Värmeforskrapport 1150, Värmeforsk, Stockholm, 2010.
- [8] M. Berntsson, O. Thorson och O. Wennberg, "Ökat elutbyte i biobränsleeldade kraftvärmeanläggningar med hjälp av förtorkning," Värmeforskrapport 1151, Värmeforsk, Stockholm, 2010.
- [9] I. Johansson, S. Larsson och O. Wennberg, "Torkning av biobränslen med spillvärme," Värmeforskrapport 881, Värmeforsk, Stockholm, 2004.
- [10] L. Hagberg, E. Särnholm, J. Gode, T. Ekvall och T. Rydberg, "LCA calculations on Swedish wood pellet production chains - according to the Renewable Energy Directive," Rapportnummer B1873, IVL, Stockholm, 2009.
- [11] T. Ekbom, "Teknikstatus och konkurrens - kraft med torrefiering," Elforskrapport 13:05, Elforsk, Stockholm, 2013.
- [12] C. Gustavsson, D. Nordgren och K. Lindberg, "Integrering av termokemiska tillverkningsprocesser med kraftvärmeproduktion: Torrefiering och snabb pyrolys," Värmeforsk, Stockholm, 2015.
- [13] J. S. Tumuluru, S. Sokhansanj, C. T. Wright och R. D. Boardman, "Biomass torrefaction process review and moving bed torrefaction system model development," INL, Idaho, 2010.
- [14] J. Rodin, "Kartläggning av energiflöden i råvaruhanteringskedjor kopplade till en biobränsleförgasningsanläggning i Göteborg," Examensarbete, Institutionen för Energi och Miljö, Avdelningen för Värmeteknik och maskinlära, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, 2008.
- [15] N. T. Trung, P. Arendt Jensen, K. Dam-Johansen, N. O. Knudsen, H. Risbjerg Sørensen och P. Szabo, "Properties of slurries made of fast pyrolysis oil and char or beech wood," *Biomass and Bioenergy*, vol. 61, pp. 227-235, 2014.

-
- [16] J. Flodén, F. Awais, D. Hersle, M. Berglund och F. Bärthel, "Sustainable Intermodal Supply Systems for Biofuels and Bulk Freight - WP 1 Report - Biofuels," Handelshögskolan vid Göteborgs Universitet, Göteborg, 2013.
- [17] T. Ekbohm, Interviewee, *Transport av pyrolysvätskor*. [Intervju]. 13 Oktober 2014.
- [18] J. Flodén, *Kalkylmodell för biobränsletransporter, Projekt Hållbara intermodala försörjningssystem för biobränsle och bulkflöden*, Göteborg: Handelshögskolan vid Göteborgs Universitet, 2014.
- [19] Trafikverket, *Nationella godstransportprognosmodellen Samgods*, Stockholm, 2014.
- [20] Network for Transport and Measures, *Environmental data for international cargo transport, Sea transport, Version 2008-10-18*, Stockholm: NTM, 2008.
- [21] Svensk Energi, "Elåret 2013," Stockholm, 2013.
- [22] Svenska Kraftnät, "Frågor om stamnät för el," 14 November 2012. [Online]. Available: <http://www.svk.se/general/Modulen-Genvagar/Vanliga-fragor-FAQ/Stamnatet-for-el/>. [Använd 20 November 2014].
- [23] Uddevalla Energi, "Kommunfullmäktige i Uddevalla kommun godkände den 11 december 2013 Uddevalla Energis planer att bygga en pelletsfabrik vid Lillesjö kraftvärmeverk," 12 December 2013. [Online]. Available: <http://www.uddevallaenergi.se/nyheter/nyheter2013/kommunfullmaktigeiuddevallakommungodkandeden11december2013uddevallaenergisplanerattbyggaenpelletsfabrikvidlillesjokraftvarmeverk.5.48faf6c114208a03d8280001021.html>. [Använd 4 Februari 2015].
- [24] J. Rodin, O. Wennberg, M. Berntsson, R. Njurell och O. Thorson, "Optimal råvaruinsats och utnyttjandegrad i energikombinat för värme, el, biodrivmedel och avsalubränsle," Värmeforsk, Stockholm, 2012.
- [25] P. Börjesson, "Energy analysis of biomass production and transportation," *Biomass and Bioenergy*, vol. 11, nr 4, pp. 305-318, 1996.
- [26] A. Edholm, "En jämförande studie baserad på ett förädlad och ett oförädlad bränsle," Värmeforskrapport 0713, Värmeforsk, Stockholm, 2007.

A Indata till förädlingsberäkningar

Tabellen nedan återger detaljerade indata till förädlingsberäkningarna för respektive fall i fallstudien. Indata har hämtats från studier nämnda i kapitel 2, befintliga anläggningar samt från tidigare utförda projekt.

Tabell 10. Indata till förädlingsberäkningar i fallstudien

Table 10. Input data to process calculations

	Enhet	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 6	Fall 7
Torkning								
Energi fuktig flis	GWh	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Fukthalt in	%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Temperatur torkluft	°C	-	80	80	80	80	80	80
Fukthalt ut	%	50%	30%	10%	10%	10%	10%	10%
Torkluftförbrukning	m ³ /s	-	50,6	50,6	50,6	50,6	50,6	50,6
Elförbrukning torkning	kJ/m ³ luft	4	4	4	4	4	4	4
<i>Hetvattenpanna för torkning</i>								
Verkningsgrad	%	-	90%	90%	90%	90%	-	-
Vattentryck	bar	-	10	10	10	10	-	-
Vattentemp.	°C	-	150	150	150	150	-	-
Elförbrukning hetvattenpanna	% av termisk	-	2%	2%	2%	2%	-	-
Bränsleflöde in, fuktig flis	kg/s	-	1,3	1,9	0,6	0,6	-	-
Bränsleflöde in, gas	MW	-	-	-	19,3	19,3	-	-
Torrefiering								
Verkningsgrad, flis till torr.flis + torgas	%	-	-	-	98%	98%	-	-
Energiandel torrefierat	% av LHV in	-	-	-	84%	84%	-	-
Energiandel torgas	% av LHV in	-	-	-	16%	16%	-	-
Energiåtgång torrefiering	MJ/kg torr flis in	-	-	-	0,37	0,37	-	-
Elförbrukning torrefiering	kJ/kg torr. flis	-	-	-	174	174	-	-
Värmevärde torrefierad flis	MJ/kg (LHV)	-	-	-	22,3	22,3	-	-
Värmevärde torrefierad flis, 5 % fukt	MJ/kg (LHV)	-	-	-	21,0	21,0	-	-
Pelletering								
Elförbrukning pelletering	kJ/kg pellets	-	-	195	-	153	-	-
Pyrolys								
Verkningsgrad, flis till produkt	%	-	-	-	-	-	96%	-
Energiandel pyrolysolja	%	-	-	-	-	-	70,3%	-

Energiandel pyrolyskoks	%	-	-	-	-	-	24,1%	-
Energiandel pyrolysgas	%	-	-	-	-	-	5,6%	-
Värmeavgivning, kondensering	% av torr flis in, LHV	-	-	-	-	-	13,2%	-
Värmevärde pyrolysolja	MJ/kg LHV	-	-	-	-	-	16,0	-
Värmevärde pyrolyskoks	MJ/kg LHV	-	-	-	-	-	29,1	-
Värmevärde pyrolysslurry	MJ/kg LHV	-	-	-	-	-	16,9	
Elförbrukning pyrolys	% av termisk	-	-	-	-	-	3,1%	-
<i>Förbränningsreaktor</i>								
Verkningsgrad, förbränning	%	-	-	-	-	-	93%	-
Alfavärde	-	-	-	-	-	-	0,45	-
Kondenskraft/ Kraftvärme								
<i>Bränsleanalys (taf)</i>								
C daf	%	51,69%	51,69%	51,69%	58,16%	58,16%	59,89%	51,69%
H daf	%	6,00%	6,00%	6,00%	5,87%	5,87%	6,23%	6,00%
S daf	%	0,03%	0,03%	0,03%	0,03%	0,03%	0,09%	0,03%
O daf	%	42,00%	42,00%	42,00%	35,69%	35,69%	34,46%	42,00%
N daf	%	0,28%	0,28%	0,28%	0,25%	0,25%	0,39%	0,28%
Effektivt värmevärde	MJ/kg LHV	20,2	20,2	20,2	22,6	22,6	24,45	20,2
Aska (torrt bränsle)	%	1,76%	1,76%	1,76%	1,55%	1,55%	0,40%	1,76%
Fukt	%	50%	30%	10%	5%	5%	28%	10%
<i>Atmosfärsförhållande</i>								
Tryck	bar	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012
Relativ fukthalt	%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%
Lufttemp.	°C	20	20	20	20	20	20	20
<i>Panndata</i>								
Luftfaktor	-	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,2
Ångtryck ut	bar(a)	140	140	140	140	140	140	140
Ångtemp. ut	°C	540	540	540	540	540	540	540
Mavatemp. in	°C	200	200	200	200	200	200	200
Förbränningslufttemp.	°C	140	140	140	140	140	140	140
Rökgastemp. efter eko.	°C	140	130	130	130	130	140	130
<i>Rökgaskondensering (RGK)</i>								
Absoluttryck i rökgaskanal	bar	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Rökgastemp. efter RGK	°C	50	50	50	50	50	50	50
<i>Systemdata</i>								
Verkningsgrad, bränsle till ånga	%	91,7%	93,4%	94,1%	94,1%	94,1%	94,2%	93,8%
Alfavärde	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,65
Elförbrukning	% av termisk	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%

B Indata till transportberäkningar

Tabellen nedan återger de detaljerade beräkningsförutsättningarna för transporten av fast bulk gods (flis och pellets). Den absoluta majoriteten av värden är hämtade från Flodén, 2014: Kalkylmodell för biobränsletransporter, Projekt Hållbara intermodala försörjningssystem för biobränsle och bulkflöden, Handelshögskolan vid Göteborgs universitet [18]. Vissa anpassningar till förutsättningarna i detta projekt har gjorts.

Tabell 11. Indata till transportberäkningar i fallstudien, fast bulk gods

Table 11. Input data for transport calculations, dry bulk goods

	Värde	Enhet
Generellt		
Energiinnehåll i diesel	35,9	MJ/liter
Elkostnad (för tågdrift)	618	kr/MWh
Avståndsbaserad banavgift	3,4	kr/tågkm
Viktbaserad banavgift	0,005	kr/tonkm
Terminalhantering, norra anläggningen		
Fasta kostnader	4	kr/MWh lastat bränsle
Rörliga kostnader	15	kr/MWh lastat bränsle
Summa	19	kr/MWh lastat bränsle
Bränsleförbrukning lastmaskin 20 m3	16	l/h
Prestation maskin, lastning	475,9	m3s/h
Dieselförbrukning lastning	0,034	l/m3s
Energiförbrukning	1,21	MJ/m3s
Lastbärare tåg: Innofreight XXL		
Lastkapacitet	45	m3
Taravikt	2,85	ton
Lastkapacitet	20,15	ton
Laskap. på Lgns-vagn (antar STAX 22,5)	14,65	ton
Kostnad per år	13 100	kr
Andel reservlastbärare i upplägg	20%	
Lok: RC4 och vagnar: Lngs, begagnade		
Längd, lok	15,5	m
Längd, vagn	13,9	m
Vikt, lok	78	ton
Taravikt, vagn	10	ton
Kostnad, lok	1 647 936	kr/år
Kostnad, vagn	16 479	kr/år
Kostnad förare	693	kr/h
Kostnad underhåll, lok	7,9	kr/km
Kostnad underhåll, vagn	0,105	kr/km
Elförbrukning, lok	5	kWh/km
Elförbrukning, vagnar	0,0155	kWh/bruttotonkm
Andel reservvagnar i upplägg	10%	
Antal lastbärare per vagn	2	

Taravikt, vagn + lastbärare	15,7	ton/vagn
Lastkapacitet	29,3	ton/vagn
Lastkapacitet	90	m3/vagn
Medelhastighet tåg (rullande)	55	km/h
Maximal dragkraft lok	1 400	ton
Växling norra anläggningen: elväxling med fjärrloket		
Kostnad växlingspersonal	477	kr/h
Tidsåtgång fjärrlok	1	h
Tidsåtgång växlingspersonal (växling in + ut + administration – 30 minuter styck)	1,5	h
Tidåtgång fjärrlokförare (växling in + ut + bromsprov – 30 minuter styck)	1,5	h
Ställtid transporttid växlingspersonal	0	h
Elförbrukning fjärrlok	1328	MJ/h
Elförbrukning fjärrlok	1328	MJ/omlopp
Extra tid för fjärrtåg på terminal utöver lastning	2,5	h
Växling terminal, södra anläggningen: växling med T44 diesellok		
Kostnad diesellok (inkl. bränsle)	888	kr/h
Tidsåtgång växlingslok	1	h
Tidsåtgång växlingspersonal	1,5	h
Tidåtgång fjärrlokförare (bromsprov)	0,5	h
Ställtid/transporttid växlingslok	0,5	h
Ställtid transporttid växlingspersonal	0,5	h
Dieselförbrukning	37	l/h
Extra tid för fjärrtåg på terminal utöver lossning	2,5	h
Terminalhantering, södra anläggningen (tåg in, bil ut)		
<i>En hantering med Innofreighttruck (lossning), två med hjullastare (stackning, lastning bil)</i>		
Fasta kostnader	4	kr/MWh lastat bränsle
Rörliga kostnader	17	kr/MWh lastat bränsle
Summa	21	kr/MWh lastat bränsle
<i>Kostnaden för Innofreighttrucken baseras på ett snttupplägg och justeras enligt nedan</i>		
Referenskostnad Innofreight	5,28	kr/MWh lastat flis
Fasta kostnader Innofreightutrustning (divideras med antal lossningstimmar/år)	764 141	kr/år
Rörliga kostnader Innofreightlossning	502	kr/h
Startkostnad Innofreight	2 500	kr/lossning
Tidsåtgång lossning tåg	4	h
Dieselförbrukning Innofreight	15	l/h
Energiåtgång Innofreight	538,5	MJ/h
Bränsleförbrukning lastmaskin	16	l/h
Prestation lastmaskin, stackning	627	m3s/h
Dieselförbrukning, stackning	0,026	l/m3s
Energiförbrukning, stackning	0,92	MJ/m3s
Energiförbrukning lastmaskin, lastning bil	1,21	MJ/m3s
Lastbilstransport: Flisbil, sidtippande		
Maximal lastkapacitet	140	m3

Maximal lastkapacitet	39	ton
Startkostnad	0	kr
Kilometerkostnad	7,11	kr/km
Timkostnad	496	kr/h
Dieselförbrukning	0,566	l/km
Energiförbrukning	20,3	MJ/km
Tidsåtgång lastning + lossning	0,5	h

Tabellen nedan återger de detaljerade beräkningsförutsättningarna för transporten av flytande bulkgoods (pyrolysslurry). Värdena är baserade på erfarenhetsmässiga uppskattningar och upplysningar från branschen. De värden som inte anges, är desamma som för fast bulkgoods (föregående tabell).

Tabell 12. Indata till transportberäkningar i fallstudien, flytande bulkgoods

Table 12. Input data for transport calculations, liquid bulk goods

	Värde	Enhet
Terminalhantering, norra anläggningen		
Tidsåtgång lastning tåg	3	h
Antal personer närvarande under lastning	1,5	
Kostnad terminalpersonal	477	kr/h
Kostad pumpning	20	kr/ton
Effekt pumpning	50	kW
Tågtransport		
Kostnad vagn (inkl. underhåll)	120 450	kr/år
Tara vagn	30	ton
Lastkapacitet vagn	60	ton
Maxvikt vagn	90	ton
Lastkapacitet vagn	60	m ³
Längd vagn	20	m
Effekt varmhållning	10	kW/vagn
Uppvärmning under tom returtransport	0,5	(halv effekt)
Terminalhantering, södra anläggningen (oljehamn)		
Tidsåtgång lossning tåg	6	h
Antal personer närvarande under lossning	1,5	
Kostnad terminalpersonal	477	kr/h
Kostad pumpning	20	kr/ton
Effekt pumpning	25	kW
Tankbilstransport		
Maximal lastkapacitet	50	m ³
Maximal lastkapacitet	38	ton
Timkostnad	620	kr/h
Km-kostnad tankbil	7,8	kr/h
Tidsåtgång tankning bil	1	h
Tidsåtgång tömning bil	1	h

Tabellen nedan återger beräkningsförutsättningarna för fartygstransporten av fast och flytande bulkods. Värdena är hämtade från Trafikverkets godstransportprognosmodell Samgods [19], NTM [20] samt från erfarenhetsmässiga uppskattningar.

Tabell 13. Indata till transportberäkningar i fallstudien, fartygstransport

Table 13. Input data for transport calculations, sea transport

	Värde, fartyg	Värde, tåg	Enhet
Kostnader			
Fordonstyp	Other vessel 3500 dwt	System train STAX 22.5	
Kapacitet	3500	959	ton
Transportkostnad fordon ⁸	35,3	50,3	kr/km
Transportkostnad fordon	1384	1384	kr/h
Lastnings- och lossningskostnad	11,5	3	kr/ton
Lastnings- och lossningstid	6	6	h
Lotskostnad norr	3191	-	kr
Lotskostnad söder	4916	-	kr
Banavgift	-	4,47	kr/km
Farledsavgift fartyg	1025	-	kr
Farledsavgift gods	3,03		kr/ton
Hastighet fartyg	15		knop
Energiåtgång			
Fartygstyp	Dry bulk ship, coastal		
Kapacitet	2852		dwt
Bränsleförbrukning, genomsnittlig	0,012		ton/km
Energiinnehåll, bränsle	41		MJ/kg

⁸ Värdena anges i 2006 års nivåer. För att kompensera för detta har det slutgiltiga resultatet för fartyg erhållits relativt resultatet för järnväg enligt den ordinarie beräkningsmodellen.

Effektiv transport av bioenergi för kraftvärmeproduktion

Resultaten av studien visar att all form av förädling leder till minskat el- och värmeutbyte i jämförelse med att inte förädla biobränslet innan transport; det lägre utbytet vägs inte upp av en motsvarande minskning i transportenergiförbrukning. Värme- och elproduktion genom förbränning av fuktig flis ger den högsta totalverkningsgraden på systembasis. Det är ekonomiskt lönsamt ur transportsynpunkt att förädla biobränsle innan långväga transport.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk