



Luftemissioner och bränsleförbrukning orsakade av bränsleförsörjningssystemet för ett svenskt kraftvärmeverk

Environmental Load Caused by the Fuel Supply System of a Swedish CHP Plant

Per-Anders Hansson, Bo Dahlin, Magnus Blinge, Björn Vikinge och Jens Berggren

Institutionen för lantbruksteknik

**Swedish University of Agricultural Sciences
Department of Agricultural Engineering**

**Rapport 243
Report 243**

**Uppsala 2000
ISSN 00283-0086
ISRN SLU-LT-R-240-SE**

FÖRORD

Författarna vill härmed tacka alla som lämnat uppgifter till studien och utan vars hjälp arbetet inte hade varit möjligt att genomföra. Vi hoppas att presenterade resultat och beräkningsmodeller skall bidra till en framtida mera miljövänlig produktion av el och värme från biobaserade råvaror i Sverige.

Vi vill också tacka KFB:s godstransport-program för finansieringen av studien.

Sammanfattning

Arbetets målsättning har varit att kartlägga de transportprocesser som genereras av ett storskaligt kraftvärmeverk baserat på förbränning av bibränslen. Målet har också varit att beräkna den energianvändning och de emissioner som anläggningens råvaruförsörjningssystem orsakar samt studera hur miljöbelastningen påverkas av förändringar i systemet.

För beräkningarna av energianvändning och emissionsmängder har modeller utvecklats för lastbils- och traktortransporter. Modellerna har anpassats till de speciella förhållandena vid transporter av bioenergiråvaror men är generella och kan användas även i kommande studier.

Data har hämtats från en anläggning med en produktion i storleksordningen 200-300 MWh/år. Anläggningen är belägen i Mälardalen. De råvaror som utnyttjas är Grot, biprodukter från omgivande sågverk som sågspån, bark, torrflis och råflis samt rötved och Salix. Den hanterade råvarumängden var 57 400 ton torrsbstans (TS) den studerade säsongen.

Resultaten visar att användningen av biprodukter som exv. sågspån och torrflis är mycket fördelaktig när det gäller att begränsa tillförselnsystemets miljöbelastning, eftersom dessa produkter bara kan antas belastas av miljöbelastningen som orsakas av transporten till förbränningsanläggningen och den övriga miljöbelastningen antas belasta den primära produkten från sågverken, exv. sågat timmer. Den Grot som fraktas till anläggningen måste först samlas upp och sedan sönderdelas, operationer som ökar systemets miljöbelastning till ca 5-8 gånger den för biprodukterna.

Analysen av hur miljöbelastningen från Grot-hantering fördelar sig över de olika operationerna visar att skotningen, flisningen och transporten till värmeverket alla medverkar till en betydande del av belastningen, medan effekterna av lastningsoperationerna är mera begränsade. Grot-hantering över terminal innebär extra transport- och lastningsmoment vilka ökar miljöbelastningen med ca 30 % jämfört med direkt transport till värmeverket.

En ökad framställning av andra varor av biprodukterna, exv. spånskivor, kommer att minska tillgången för värmeverken. Resultaten visar att om 50 % av alla biprodukter måste bytas ut mot Grot så ökar den totala dieselförbrukningen med 20 %, om man antar att medelavstånden för Grot-transporterna inte ökar, och med 30 % om man antar att avstånden ökar med 20 km.

Resultaten visar även att dieselförbrukningen för att tillföra ett ton TS till värmeverket i form av Salix är något lägre än för motsvarande mängd Grot. När det gäller energianvändningen och för övervägande delen av emissionerna är dock resultaten de omvända. Detta förklaras av att produktionen av konstgödseln till Salix-odlingen kräver stora insatser av framförallt elektrisk energi.

Emissionerna från logistiksystemet har även relaterats till de emissioner som produceras vid förbränningen av bränslena i kraftvärmeverket. Mängderna CO₂ från försörjningssystemet är små (ca 1 %) jämfört med mängderna som alstras vid förbränningen, men eftersom den CO₂ som frigörs vid förbränningen tidigare har lagrats upp i biomassan, så är det försörjningssystemet som alstrar den övervägande nettodelen av CO₂-emissionerna vid produktion av biobaserad el och värme. NO_x-emissionerna från dagens försörjningssystem uppgår till ca 20 % av mängderna som kommer genom anläggningens skorsten. Vid förbränningen i kraftvärmeverket är utsläppen av kolväten (HC) mycket låga medan förbränningen av de fossilbaserade bränslena i fordonsmotorerna enligt beräkningarna producerar ca 800 kg oförbrända kolväten.

Resultaten visar vidare att de strängare emissionskrav som kommer att gälla framöver sannolikt har viktigast effekt på NO_x-emissionerna, vilka kan komma att minska med 60-70 % inom en 10-årsperiod. Dessutom kan HC-utsläppen komma att reduceras med ca 35 %. En minskning av mängden CO₂-emissioner per ton TS kan däremot bli svår att uppnå utan genomgripande förändringar i systemet.

Abstract

The purpose of this work was to quantify the energy consumption and emission production of the fuel supply system for a typical Swedish biofueled CHP plant. A model, useful also for other studies of CHP plant fuel supply systems, was developed and used for the calculations. Input data was collected from a plant situated some 100 km from Stockholm in Sweden. Important fuel materials are chips from limbs and tops, by-products from saw mills and chips from willow.

The results show that the materials that are by-products from other production processes, for example saw dust and saw mill chips, are very favourable in terms of the studied environmental parameters. The environmental load for the supply of chips from limbs and tops is 5-8 times the load for the by-products. The use of a terminal for temporary storage of means that additional transport and loading operations are necessary and gives a 30 % load increase. Further, chipping at the clear felling area results in somewhat larger environmental load than chipping at the roadside.

Calculations were also done in order to study the effects of different changes in the supply system. One important result of these calculations is that the NO_x emissions caused by the system will, due to stricter emission regulations, decrease with up to 70 % within the next 10-12 years. The decrease of the fuel consumption and the amounts of emissions produced will, however, be much smaller.

INNEHÅLL

1. Inledning.....	8
2. Arbetets syfte.....	9
3. Modell för beräkning av emissioner från lastbils- och traktortransporter.....	9
3.1. Modellens syfte	9
3.2. Metodik	9
3.2.1. Momentkurva	10
3.2.2. Rullmotstånd	10
3.2.3. Luftmotstånd	11
3.2.4. Rotationsacceleration/retardation.....	11
3.2.5. Vertikala lägesförändringar	11
3.2.6. Bromsning	11
3.2.7. Växlingsstrategi.....	12
3.3. Indata.....	12
3.3.1. Motorer.....	12
3.3.2. Last.....	13
3.3.3. Emissionsdata.....	13
3.3.4. Vägdata.....	17
3.3.5. Fordonsdata	17
3.3.6. Körcykel	18
3.3.7. Tomtransporter	18
3.4. Validering.....	18
3.5. Känslighetsanalys.....	22
3.5.1. Rullmotståndskoefficient	22
3.5.2. Fordonsmassa	23
3.6. Beräknade värden för bränsleförbrukning och emissioner	27

4.	Deloperationer som ingår i kraftvärmeverkets råvaruförsörjningssystem	32
4.1.	Maskiner och produktionsprocesser	32
4.1.1.	Skotare	32
4.1.2.	Maskiner för flisningsoperationer	32
4.1.3.	Maskiner för lastningsoperationer	33
4.1.4.	Salixproduktion	33
4.2.	Transportprocesser	34
4.3.	Emissionsdata	34
5.	Beskrivning av nuvarande tillförselsystem	36
5.1.	Råvarumängder	37
5.2.	Grot	37
5.2.1.	Direkt transport till anläggningen	37
5.2.2.	Transport över terminal	37
5.3.	Rötved	38
5.4.	Övriga biprodukter	39
5.5.	Salix	40
6.	Energianvändning och emissioner orsakade av nuvarande råvaruförsörjningssystem	41
7.	Möjliga förändringar av logistiksystemet och resulterande miljöbelastning	43
7.1.	Allmän känslighetsanalys	43
7.2.	Effekter av strängare emissionskrav	44
7.3.	Effekter av reducerade transportavstånd	45
7.4.	Effekter av ökade möjligheter att utnyttja returtransporter	45
7.5.	Effekter av ökad andel traktortransporter	46
7.6.	Effekter av ökad Salixanvändning	46
7.7.	Effekter av reducerad användning av biprodukter	47
8.	Diskussion	48
8.1.	Metodik och indata	48

8.2. Val av tillförselsystem.....	48
8.3. Emissioner från förbränningen.....	49
8.4. Effekter av strängare avgaskrav	50
8.5. Områden med behov av framtida studier	51
9. Referenser.....	51

1. Inledning

Användningen av biobaserade råvaror för energiproduktion har stora fördelar ur bland annat miljösynpunkt, och utvecklingen i Sverige har de senaste åren gått mot en kraftigt utökad användning av bioenergi. En stor del av biobränslena utnyttjas i stora anläggningar för produktion av el och värme alternativt enbart värme.

Utmärkande för de aktuella råvarorna är ett lågt energiinnehåll per volymenhet och en relativt låg densitet. Storskaliga anläggningar för bioenergiproduktion kräver därför stora volymer av råvaror och ett omfattande logistiksystem för att transportera dessa råvaror. Logistiksystemen förbrukar stora mängder fossila bränslen och bidrar till stora mängder emissioner varför nyttan av användningen av de förnybara råvarorna reduceras ur miljösynpunkt.

Anläggningarna för energiproduktion är normalt utformade för att användas för flera olika bränslen. Bränslevalen styr kraven på logistiksystemet och har en avgörande påverkan på miljöbelastningen som alstras eftersom även transportavstånden påverkas av råvaruvalen. För vissa råvaror, exempelvis halm och energiskogsflis finns möjligheter att redan i planeringsskedet bestämma råvarukällans lokalisering, d.v.s. var odlingen skall ske. För andra råvaror saknas denna möjlighet, exempelvis för biprodukter från sågverk där råvarukällans lokalisering inte kan påverkas, förutom på mycket lång sikt.

Huvuddelen av råvarutransporterna till bioenergianläggningarna utförs med lastbils- eller traktorslöp. Brytpunkten mellan de båda transportslagens ekonomiska lämplighet har i tidigare studier visat sig ligga mellan 20-40 km (Kristensson och Axenbom, 1991), men idag är andelen lastbilstransporter sannolikt över 99 %.

Val av råvarutyp, råvarukälla och transportsystem sker i nuläget i stort sett enbart med hänsyn till ekonomiska målvariabler medan resursförbrukning och miljöbelastning får en underordnad betydelse.

För att en bedömning av logistiksystemens miljöpåverkan skall vara möjlig krävs allmänt accepterade beräkningsmodeller för de olika transportslagens energianvändning och utsläpp av emissioner vid de olika förhållanden som råder vid transporter av bioenergiråvaror. Det är viktigt att dessa modeller är utformade så att använda samband och indata kan kontrolleras av alla användare och att modellerna därigenom kan få en generell användning inom området.

Potentialen för att effektivisera transporterna av bioenergirelaterade produkter och minska den totala miljöbelastningen kan vara omfattande. Trots detta saknas tillämpbara studier av hur faktorer som råvaruval, lokalisering av råvarukällor och transportsamordning påverkar det totala logistikarbetet nödvändigt för att försörja större bioenergianläggningar. Kunskap saknas också om hur dessa faktorer kan förändras (optimeras) för att reducera resursanvändningen och systemets totala miljöbelastning.

Tidigare arbeten inom området har i huvudsak varit inriktade mot att i ett större perspektiv bedöma effekterna av en ökad bioenergianvändning samt vilka potentiella råvarukällor som finns och deras regionala fördelning (exv. Börjesson och Gutavsson, 1996). Denna typ av arbeten är värdefulla, och antalet referenser inom området är omfattande, men för att direkta förbättringar skall uppnås krävs operativa studier på anläggningsnivå. Cundiff et al. (1997) redovisar en sådan studie men inriktad på enbart ekonomiska parametrar och amerikanska förhållanden. Liknande ekonomiska studier för svenska förhållanden har utförts t.ex. av Eriksson (1992) och Staland och Westerberg (1991).

2. Arbetets syfte

Arbetet syftar till att kartlägga de transportprocesser som genereras av ett storskaligt kraftvärmeverk baserat på biobränslen samt studera hur förändringar i faktorer som råvaruval, råvarukällornas lokalisering och utnyttjande av returtransporter påverkar transportsystemet.

Arbetet syftar också till att beskriva den miljöbelastning i form av energianvändning och utsläpp av emissioner som råvaruförsörjnings-systemet ovan bidrar till samt studera hur miljöbelastningen påverkas av förändringar i systemet. För beräkningarna av energianvändning och emissionsmängder utvecklas modeller för de vanligaste transportsätten, lastbil och traktorsläp. Modellerna anpassas till de speciella förhållandena vid transporter av bioenergiråvara men görs samtidigt så anpassningsbara och generella att de kan användas även i kommande studier.

Det planerade arbetet utförs för att ge en grund inför kommande mera omfattande studier med målsättningen att minimera miljöeffekterna av bioenergisystemet. Förutom ovanstående mera specifika syften är alltså ett viktigt mål med arbetet att identifiera områden där kunskapsluckorna är speciellt omfattande och där de potentiella vinsterna med mera omfattande forskning är speciellt stor.

3. Modell för beräkning av emissioner från lastbils- och traktortransporter

3.1. Modellens syfte

Syftet med denna del av arbetet var att konstruera en fysikalisk modell för beräkning av utsläpp och bränsleförbrukning från biobränsletransporter med traktor och lastbil med hänsyn till motorns olika varvtal och vridmoment. Modellen skall vara generell och vara möjlig att applicera på olika typer av transporter. I denna beskrivning har dock antaganden och exempel anpassats till villkor som gäller för biobränsletransporter i det studerade området.

3.2. Metodik

Två datamodeller, avsedda för simulering av lastbils- respektive traktortransporter, är utvecklade. Modellerna är i princip uppbyggda på samma sätt och skiljer sig endast åt vad gäller fordonsindata, maximalt tillåtna hastigheter och rullmotståndsberäkningar.

Modellerna kan delas upp i två delar; en fysikalisk del som med hjälp av mekanikens lagar beskriver de krafter som verkar på transportfordonet, samt en beteende-del som beskriver hur föraren kontrollerar fordonet under en transport.

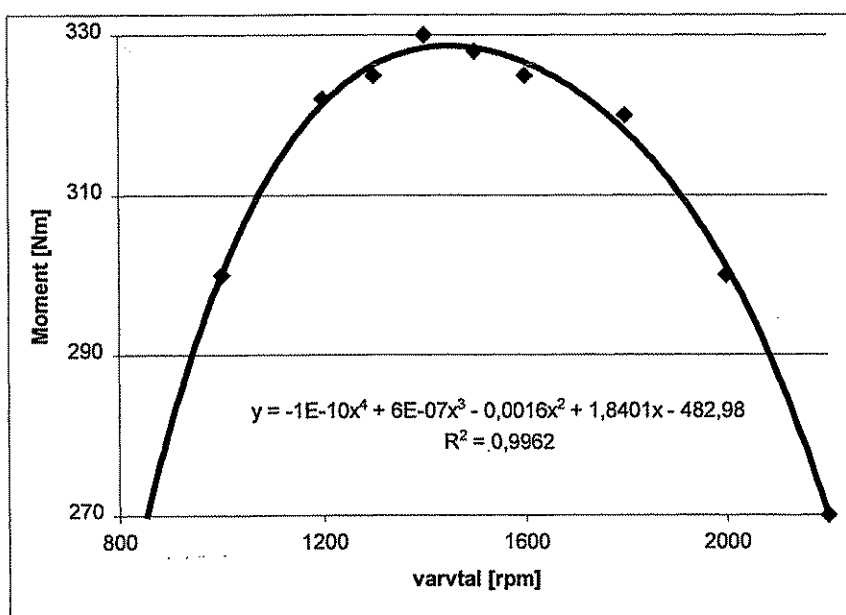
Den fysikaliska delen består av teoretiska och empiriska ekvationer som kopplats samman så att de tillsammans beskriver hur transportfordonet beter sig under en transport. Indata till denna del av modellen är uppgifter om fordonet, t.ex. vikt, momentkurva, emissionsdata etc., samt om dess fysikaliska omgivning, t.ex. vägbanans lutning.

Den mera beteendeinriktade delen av modellen simulerar en förarens handlingssätt under en transport vid t.ex. acceleration, inbromsning, växling m.m. Datorn ges en uppsättning förhållningsorder genom villkorssatser. Till exempel om hastigheten nått den maximalt tillåtna skall accelerationen upphöra, eller om varvtalet är på väg att falla utanför det ekonomiskt optimala varvtalsområdet skall växling ske. Denna del av modellerna kan sägas ge de rumstypiska förutsättningarna för den fysikaliska delen av modellen.

Motorns vridmomentet resulterar väsentligen i en kraft mellan drivhjulen och körbanan. Denna kraft ger massan hos vagnen och dragfordonet en viss acceleration. Utöver denna drivkraft måste vridmomentet räcka till för att övervinna ett flertal motstånd och trögheter; rullmotstånd hos dragfordonets och vagnens hjul, luftmotstånd, friktion i transmissionen samt förändringar i rotationsenergi och lägesenergi.

3.2.1. Momentkurva

En av de viktigaste karaktäristika för en motor beskrivs av dess momentkurva. I modellen approximeras momentkurvan med en minstakvadratanpassad fjärdegradsekvation utifrån ett antal värden ur tillverkarens produktblad (se Fig. 1).



Figur 1. Exempel på momentkurva och anpassad funktion för Valmet 420 DS

3.2.2. Rullmotstånd

Rullmotståndet hos traktorns bakhjul beräknas med hjälp av en empirisk ekvation från Steiner och Sönhe (1979).

$$\text{Rullmotståndskoeff}[\%] = 8,0 \cdot \frac{F[\text{kN}]^{0,16} \cdot B[\text{cm}]^{6,05}}{P[\text{N}/\text{cm}^2]^{0,40} \cdot D[\text{cm}]^{0,62} \cdot H[\text{cm}]^{5,78}} + 0,05$$

Denna ekvation är mycket känslig för förändringar i däckets bredd (B) och höjd (H). F betecknar normalkraften i kontaktytan mellan däckets och körbanan och P är lufttrycket i däckets. Det anges inte några gränser för ekvationens giltighetsområde men den bör användas med försiktighet och endast med relativt normala däcksdimensioner och -tryck.

Rullmotståndet på asfalt hos traktorns framhjul, vagnens samt lastbilens hjul har approximerats till en procent av normalkraften på hjulet enligt uppskattning av Bengt Jacobsson (1999). Vid modelleringen har det antagits att rullmotståndet på sand- och grusvägar, för lastbil och släp, är 50% större än på asfalt d.v.s. 1,5%.

3.2.3. Luftmotstånd

Luftmotståndet (F_{luft}) beräknas på konventionellt sätt som en funktion av fordonets frontarea (a), c_v -värde (c_v), luftens densitet (ρ) och fordonets hastighet (v).

$$F_{luft} = c_v \cdot a \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}$$

c_v -värdena approximeras med medelvärden ur "Air Drag Coefficients" (1999, Internet). Lastbil med släp antas sålunda ha c_v -värde 0,77 medan traktor med släp har c_v -värde 0,90. Luftens densitet antas vara konstant med värdet $1,20 \text{ kg/m}^3$ och eventuella vindkrafter försummas.

3.2.4. Rotationsacceleration/retardation

Det krävs ett vridmoment för att ändra varvtalet hos fordonets roterande delar. Detta moment är proportionellt mot derivatan av varvtalets förändring över tiden samt mot de roterande delarnas tröghetsmoment. I modellen har det antagits att tröghetsmomentet hos vevaxlar, svänghjul, transmission m.m. kan approximeras med en cirkulär homogen skiva med lika stor radie som svänghjulet. Massan hos denna skiva antas vara 70 kg för traktorn och 150 kg för lastbilen och radien 20 resp. 22 cm. Tröghetsmomentet för delar som roterar med nedväxlat varv jämfört med motorn försummas i modellen. I modellens grundutförande antas friktion i transmissionen leda till momentförluster på 5 procent.

Eftersom växlingen i modellen genomförs under ett tidssteg, ca 0,2 sek, kommer varvtalet vid nedväxling att förändras mycket kraftigt. Då en växel alltid antas ha ingrepp gör detta att motorn skulle få tillbaka kraft förlustfritt, genom att sänka varvtalet. Detta sker inte i verkligheten p.g.a. slirning och friktion i kopplingen m.m. I modellen antas att rotationsretardation maximalt kan ge tillbaka 15 Nm.

3.2.5. Vertikala lägesförändringar

Data om vägens elevation från vägdatabanken har utnyttjats för att beräkna vägbanans lutning, se vidare under vägdata. Vid körning i med- och motlut förändras gravitationens (g) vinkel gentemot rörelseriktningen vilket även påverkar normalkraften vid däckens kontakt med körbanan. Gravitationen kan delas upp i komponenter parallellt med (F_{\parallel}) och vinkelrätt mot (F_{\perp}) körbanan. Förändringen av normalkraften är mycket liten vid de lutningar det rör sig om vid vägtransporter. Eftersom rullmotståndskoefficienten för bakhjulen i traktormodellen beror på normalkraften på de samma beräknas ändå förändringen för fullständighets skull.

3.2.6. Bromsning

Sänkning av hastigheten i lastbilmodellen kan ske både med motorbroms och med det normala bromssystemet. I traktormodellen antas att hastigheten aldrig överstiger 10 m/s d.v.s.

36 km/h. I lastbilsmodellen har det antagits att gasen släpps så att fordonet motorbromsas då heltalsdelen av aktuell hastighet är högre än tillåten hastighet. Då hastigheten är 10 km/h över tillåten hastighet trycker föraren på bromspedalen. Det antas att bromsen doseras hårdare ju högre hastighet över den tillåtna ekipaget håller. Det är lagkrav på att maximal bromsverkan skall vara minst $4,5 \text{ m/s}^2$. Enligt Zackrisson (1999) på Volvo Lastvagnar är maximal bromsverkan hos Volvo FH12 och FH16 ungefär 5 m/s^2 . I modellen antas att då ekipaget färdas 50 km/h för fort används all tillgänglig bromsförmåga. Bromsanvändningen minskar linjärt så att föraren vid 10 km/h för hög fart använder en femtedel av maximal bromsverkan.

Lastbilarna i modellen är utrustade med avgasmotorbromsar. Det maximala bromsande momentet (MB) hos avgasmotorbromsar förändras enligt Zackrisson (1999) linjärt med varvtalet (n):

$$MB_{VolvoD12A} = 0,0723 \cdot n + 882,65$$

$$MB_{VolvoD16A} = -0,199 \cdot n + 1631,5$$

Vid motorbromsning antas att det inte bildas några emissioner och att det går ej åt något bränsle.

3.2.7. Växlingsstrategi

Valet av växlingsstrategi är mycket betydelsefullt för modellens beteende. Det finns stora skillnader mellan olika förarens körstilar (McCormack, 1990) och det är svårt att simulera mänskligt beteende med enkel datakod.

Växling sker om varvtalet annars skulle falla utanför ett fördefinierat intervall. Hur detta intervall ska sättas är av stor betydelse för modellens uppträdande, och är en av de parametrar som säkert varierar mycket mellan olika förare. I modellens grundscenario definieras gränserna för detta intervall av motortillverkarens angivelser av "ekonomiska varvtal".

3.3. Indata

De indata som behövs i modellen är data rörande dragfordonet, lasten, samt den väg transporten sker på. För dragfordonet behövs data angående momentkurva, utväxlingsförhållanden, däcksutrustning, vikten och dess fördelning, tvärsnittsarea mot färdriktningen, samt emissioner och bränsleförbrukning mätta enligt A30-metoden.

3.3.1. Motorer

Traktormotorn som utgör grund för de beräknade resultaten är en turbomatad 4-cylindrig Valmet 420 DS med en maxeffekt på ca 70 kW. Cylindervolymen är 4,4 liter.

De lastbilsmotorer som har efterliknats i denna studie är båda från Volvo. Biobränsletransporter sker företrädesvis med lastbilar utrustade med stora motorer. Därför valdes motorer från Volvos två största motorfamiljer, D12 och D16. Bägge motorerna är raka 6-cylindriga dieselmotorer med turboladdning och intercooler. Volvo D16, med en cylindervolym på 16,1 liter, finns i två effektutföranden, 470 hk (346 kW) och 520 hk (382 kW). Beräkningarna bygger på data från den starkare versionen. Volvo D12 har en cylindervolym på 12,1 liter och den motortyp som använts i modellen har en maxeffekt på 420 hk (309 kW).

3.3.2. Last

Enligt uppgift från Hedberg (1999) på Naturbränsle AB är det väglagen som begränsar mängden last vid bibränsletransporter med lastbil. Sålunda antas att alla lastbilstransporter sker med en totalvikt av 60 ton. Beroende på fordonstyp, timmer-, bulk- eller containerbil kommer 42,5 ton, 36,5 ton respektive 32,5 ton av denna vikt att utgöras av nyttig last.

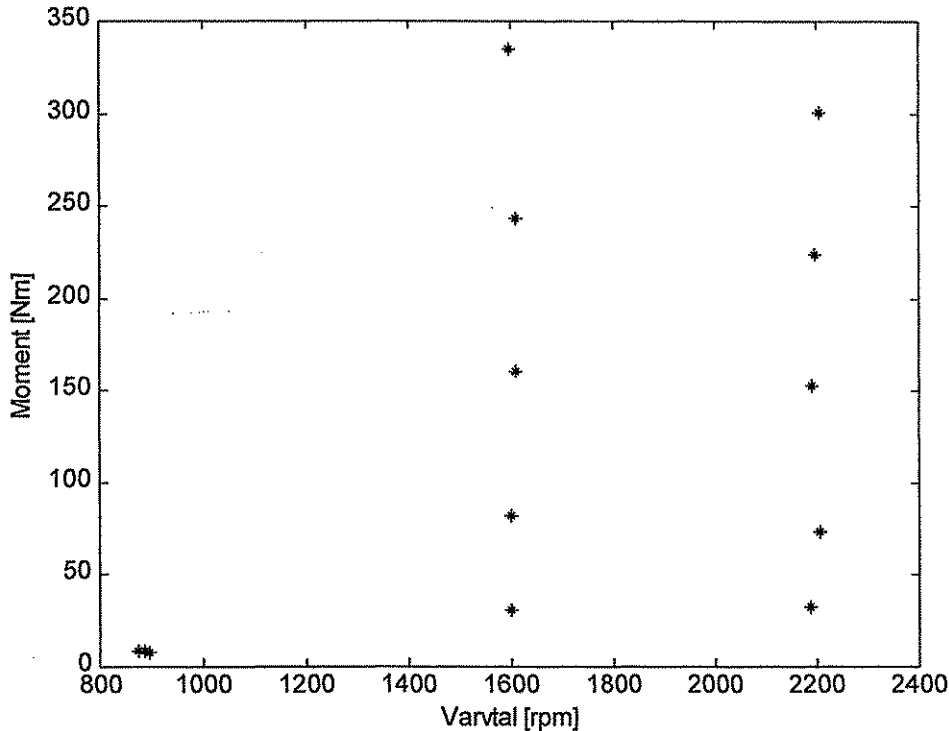
Mängden last vid traktortransporter avgörs av hur mycket föraren vill belasta motorn samt av traktorns dragförmåga. Lämplig mängd last beror på hur branta backar det finns längs färdvägen. I verkligheten skulle föraren avpassa lastmängden efter den väg han avsåg att färdas. För att lättare kunna jämföra mellan olika sträckor görs inte detta i modellen. Istället används en vagnsutrustning och en lastmängd som fungerar på alla sträckor. Vidare antas att endast horisontella krafter överförs mellan traktor och vagn.

3.3.3. Emissionsdata

Enligt Fordonskungörelsen (1972:595) skall alla fordons motorer ha ett avgasgodkännande för att överhuvudtaget få tas i bruk. För motorer med kompressionständning, avsedda för fordon med totalvikt över 3500 kg, som har en designhastighet över 30 km/h och huvudsakligen är avsedda för vägtransport anges kraven för avgasgodkännande i "Kungörelse med föreskrifter om avgasrening för dieselmotordrivna tunga bilar, miljöklass 3" (SNFS 1991:11). Denna kungörelse föreskriver bl.a. att alla dragfordon skall testas enligt A30-regulation.

En av grundstenarna i modellen är emissionsdata från körcykeln A30 (ECE R49). Vid mätningar enligt A30 metoden mäts utsläpp av CO, NO_x och HC samt bränsleförbrukning vid 13 statiska moment- varvtalspunkter. De 13 punkterna är:

- 1) tomgångsvarv, ingen yttre belastning
- 2) varvtal där motorn ger maximalt moment, belastning 10% av maximal belastning
- 3) varvtal som punkt (2), belastning 25% av maximal belastning
- 4) varvtal som punkt (2), belastning 50% av maximal belastning
- 5) varvtal som punkt (2), belastning 75% av maximal belastning
- 6) varvtal som punkt (2), maximal belastning
- 7) tomgångsvarv, ingen yttre belastning
- 8) maximalt varvtal, belastning max. vid detta varvtal
- 9) maximalt varvtal, belastning 75% av max. vid detta varvtal
- 10) maximalt varvtal, belastning 50% av max. vid detta varvtal
- 11) maximalt varvtal, belastning 25% av max. vid detta varvtal
- 12) maximalt varvtal, belastning 10% av max. vid detta varvtal
- 13) tomgångsvarv, ingen yttre belastning



Figur 2. Mätpunkter vid ECE R49 på Valmet 420DS

För att använda dessa data i en modell som genererar kontinuerliga serier av moment och varvtal måste värden för punkter mellan mätpunkterna interpoleras fram. Detta kan göras på flera olika sätt. I modellen används metoder som beräknar de bäst kvadratanpassade funktionerna mellan mätpunkterna för att sedan beräkna nya värden för de moment- varvtalskombinationer som modellen genererar. På detta sätt konstrueras tredimensionella funktionsytor som beskriver hur emissionerna och bränsleförbrukningen varierar med moment och varvtal.

Enligt mätstandarden skall mätpunkterna ligga längs tre varvtalslinjer men detta åstadkoms sällan i praktiken. För att klara av interpolationen i Matlab behöver man behandla datapunkterna så att de ligger längs rätta varvtalslinjer och så att dataområdet blir rektangulärt. Detta inbegriper följande operationer:

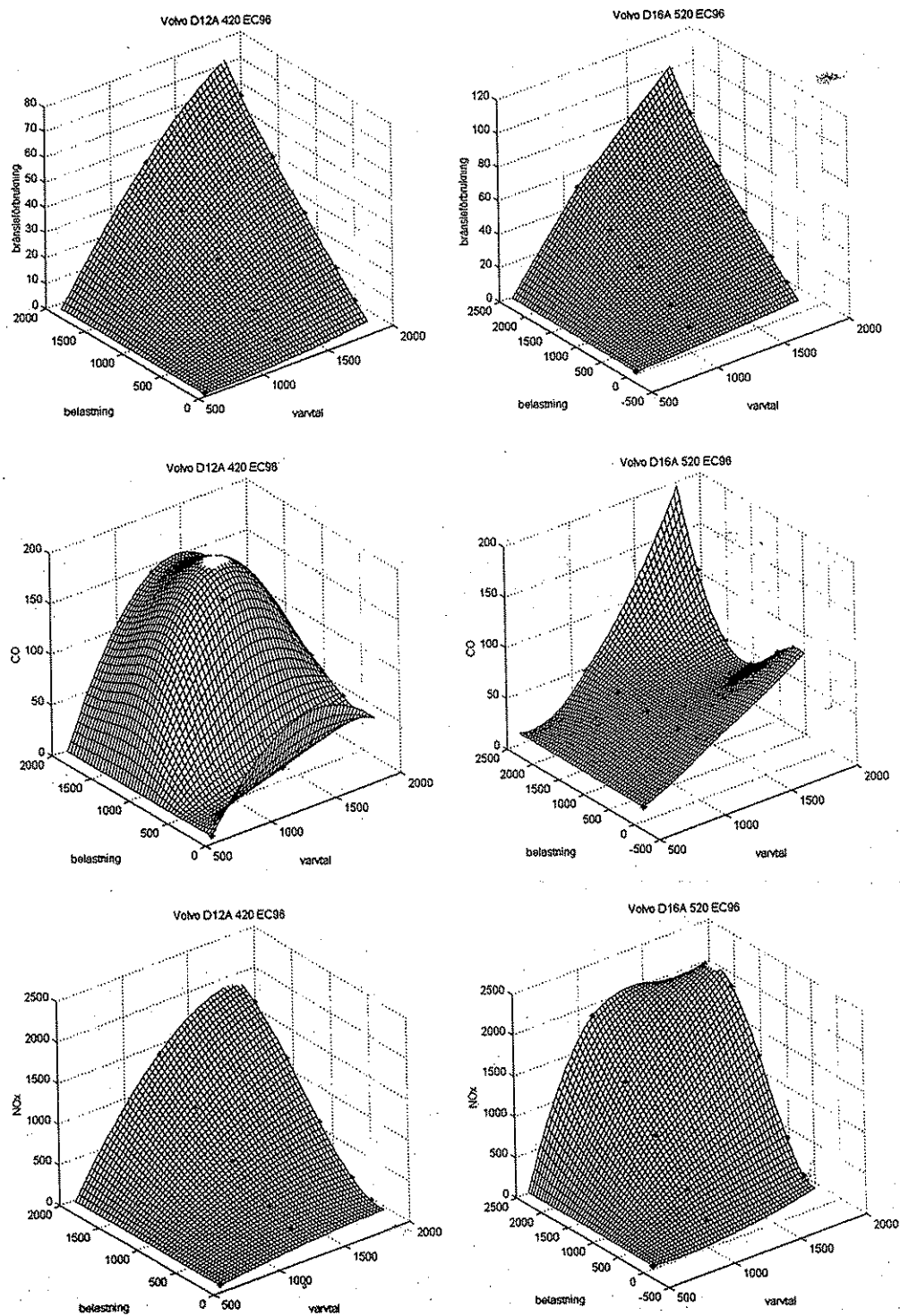
- 1) de tre varvtalsserierna approximeras med sina respektive medelvärden.
- 2) emissionsvärdena vid det varvtal som motsvarar tomgång antas vara det samma oavsett belastning

För att kunna utföra den tvådimensionella interpolationen i Matlab måste även belastningsvärdena vara gemensamma för de olika varvtalsserierna. Detta åstadkoms med funktionen `interp1` med metodangivelsen 'spline'. Spline är en funktion som tar fram separata polynomfunktioner mellan datapunkterna under förutsättning att funktionernas första och andra derivator är lika i mätpunkterna. Spline kan bete sig något oväntat om man har få och ojämnt fördelade datapunkter men den används ändå här då det är ett enkelt, reproducerbart och logiskt sätt att beräkna de värden som saknas. Det är också enkelt att, i de fall flera

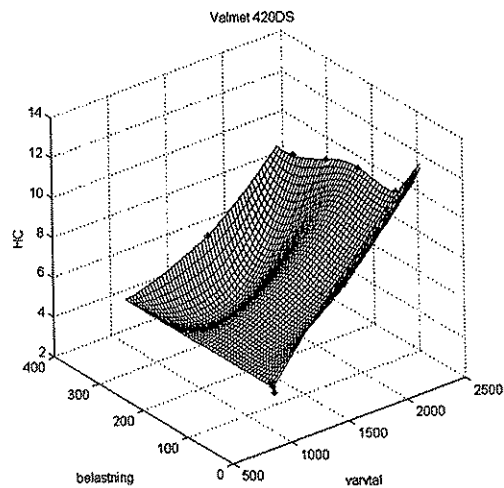
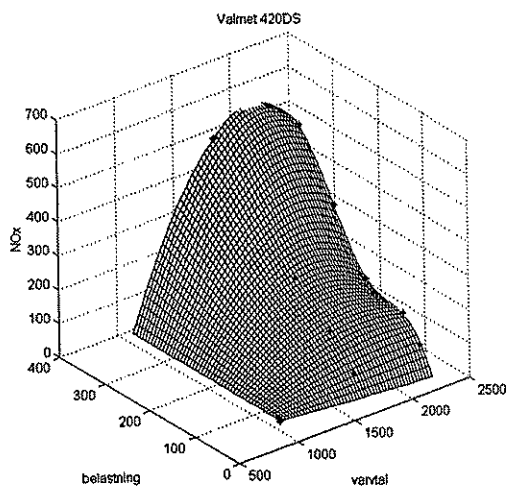
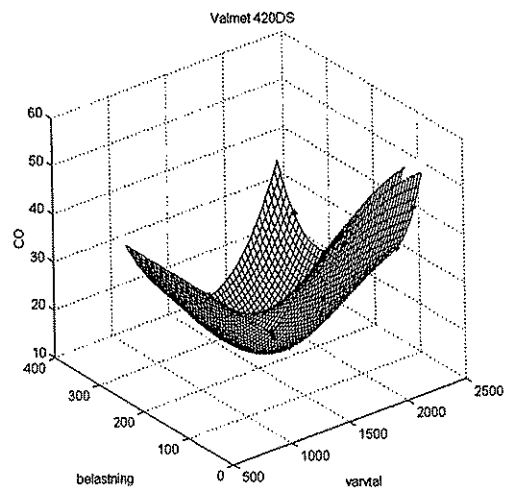
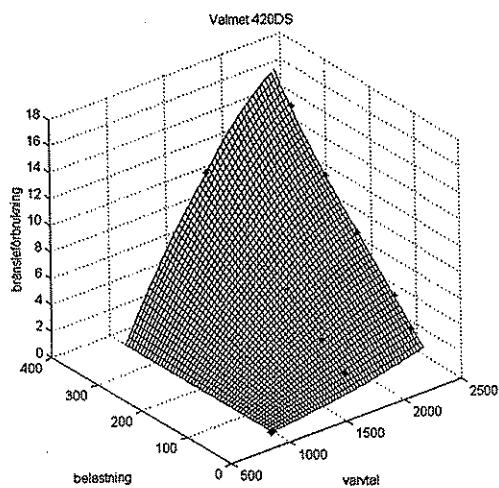
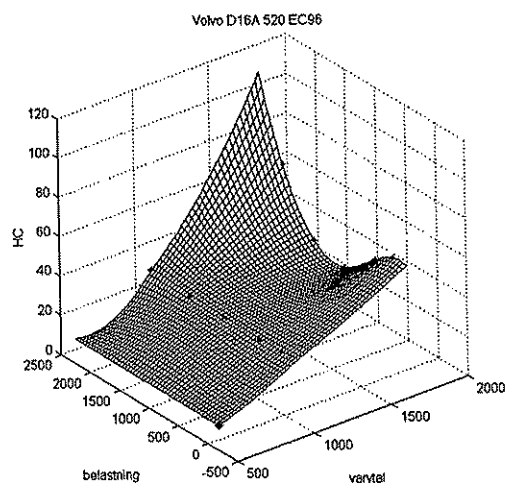
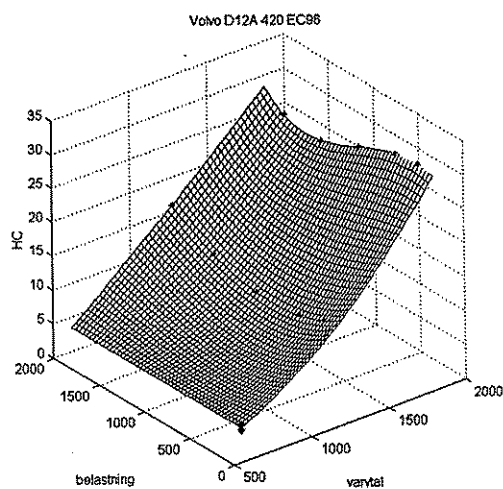
mätpunkter är tillgängliga, lägga till värden och på så sätt öka precisionen i inter- och extrapolationen

För varje tidssteg i modellen fås ett talpar bestående av varvtals- och belastningsvärden. Utifrån dessa interpolerar Matlab fram värden för emissioner enligt en definierad metod. I modellen används metoden "bicubic".

När alla inter- och extrapolationer utförts fås funktionsytor som i Figur 3 och 4.



Figur 3. Funktionsytor för emissioner och bränsleförbrukning



Figur 4. Funktionsytor för emissioner och bränsleförbrukning

Som Figur 3 och 4 antyder är det stor skillnad mellan emissionerna från olika motorer, även från samma tillverkare och årsmodell. Störst skillnad är det mellan koloxidkurvorna. Denna spridning gör att användning av generella siffror för beräkning av utsläpp från lastbils-transporter kan ge mycket felaktiga resultat. I diagrammen har även de 13 mätpunkterna plottats in som *, för att möjliggöra jämförelser mellan faktiska och approximerade värden.

Eftersom diagrammen ovan är rektangulära i basen visas även värden för kombinationer av moment och varvtal som inte uppnås i praktiken. De övre hörnen, d.v.s. höga moment vid låga och höga varvtal, ligger utanför området som begränsas av maxmomentkurvan.

3.3.4. Vägdata

Data rörande vägnas elevation och deras hastighetsbegränsningar har erhållits från Vägdata-banken. Elevationsdata har använts för att beräkna den genomsnittliga lutningen. Det finns data på det exakta avståndet mellan elevationspunkterna, men eftersom dessa var svåra att ta fram och eftersom modellen inte avsåg att studera någon speciell vägsträcka har det antagits att punkterna är jämt fördelade över den aktuella sträckan. Detta medför ett visst fel då man ofta har lagt mätpunkterna närmare varandra på platser man uppfattat som intressanta, t.ex. i kurvor. Medelfelet i profilmätningarna skattas till ± 3 m, det relativa felet är mycket mindre.

De vägar som använts vid simuleringarna är 55, 70, 558, 561, 569, 571 och 813.

Vid modellering av skogsvägskörning har samma vägsträckor som vid landsväg använts. Skillnaden är den att hastigheten begränsats till 20 km/h för lastbilar försedda med Volvo D16- och Volvo D12-motorer och att rullmotståndet ökats med 50%.

3.3.5. Fordonsdata

Fordonsdata har hämtats från tillverkarnas produktblad och informationsavdelningar. I vissa fall har data från oberoende provningsinstitut och myndigheter varit tillgängliga.

Grundscenario traktor:

Motor: Valmet 420 DS, 70kW

Bränsle: Miljöklass 1 (Shell Citydiesel)

Vagnar: två stycken Ace de blå 10LT, lastar tio ton, 23 m³, tomvikt 2600 kg (Landbrugets Maskinöversikt 1998)

Däck: 18,4R34/144A8, effektiv omkrets 4,925 m och bredd 0,467 m (Anderson, 1999)

Frontarea: 6 m²

Transmission: Vid transport antas att endast de sju högsta växlarerna används. De ger hastigheter mellan 29 och 4,7 km/h vid 2225 varv/min

Grundscenario lastbil:

Motor: Volvo D12A 420 alternativt Volvo D16A 520

Tomvikt: Containerbil 27,5 ton, bulkbil 23,5 ton, timmerbil 17,5 ton

Totalvikt: 60 ton

Däck: diameter 1,09 m, däckets antas pressas samman 12 mm vid full belastning.

Frontarea: 7 m²

Transmission: 16A antas utnyttja samtliga lågväxlar samt högsta högväxeln hos SR2400 växellådan. 12A har en SR1900 växellåda med totalt 14 växlar.

3.3.6. Körcykel

I samtliga undersökta fall har simuleringarna startat från noll på de platser som ligger först i Vägdatatabankens filer. Lastbilstransporten accelereras upp till den för tillfället maximalt tillåtna hastigheten och håller sig sedan vid dessa, så länge det inte lutar för brant uppåt eller nedåt. Traktorn accelereras från noll upp till 30 km/h och regleras sedan för att försöka hålla denna hastighet.

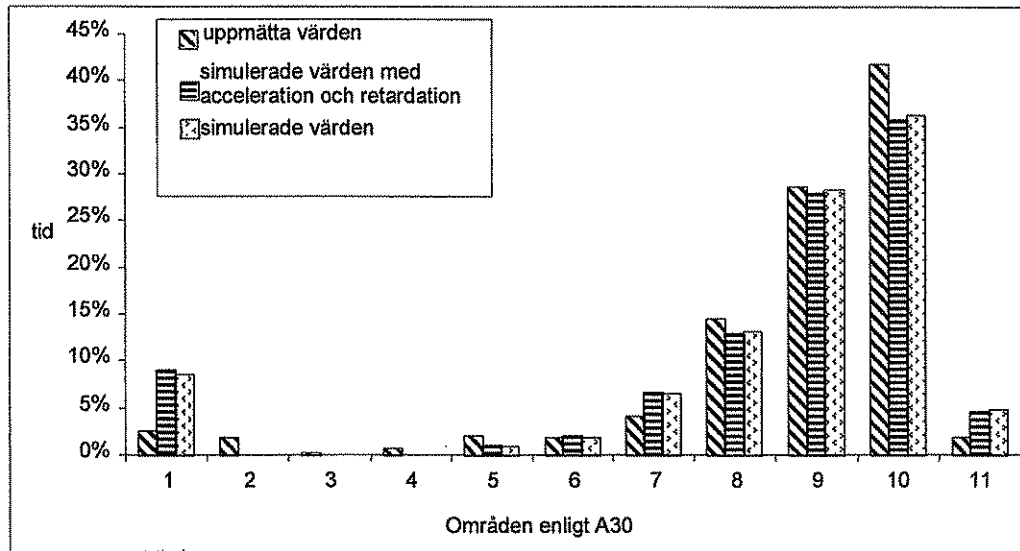
Sträckorna i vägdatatabankens filer är i allmänhet längre än det genomsnittliga transportavståndet för de aktuella biobrännstyperna. Eftersom stopp inte lagts in under själva transporten görs en separat startacceleration från 0 till 70 km/h (0 till 30 km/h för traktorn) på plan mark och resultaten multipliceras med ett lämpligt tal och läggs till utsläppsberäkningarna. I rapporten visas resultat med och utan tillägg för dessa accelerationer. Den faktor som accelerationen multipliceras med har anpassats så att det är en startacceleration varje mil. Traktorn har genomgående kortare startaccelerationssträckor eftersom den endast accelereras till 30 km/h.

3.3.7. Tomtransporter

För att få med hela transportkedjan har även de tomma returtransporterna simulerats. Vid de utförda simuleringarna har accelerationen startat med den tredje växeln ilagd. Detta torde stämma relativt väl med normal växlingsstrategi vid lätta belastningar.

3.4. Validering

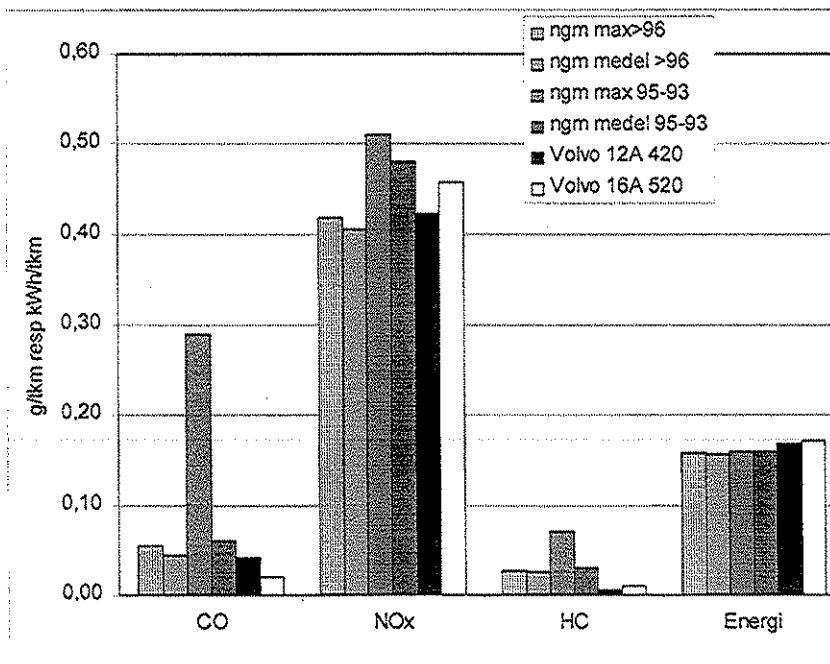
Det är svårt att utföra en totalvalidering av traktormodellen. Det finns dock inspelade data från en traktortransport på landsväg och i stad med en Velsa boggikärra, typ 8TV, lastad med 8,8 ton sand (Hansson m.fl., 1998). Vid denna transport mättes inte emissioner utan moment och varvtal. Det gör att de inspelade data inte kan användas för att validera utsläppsdelen av modellen. I stället jämförs fördelningen av varvtal- och momenttalparen. För att kunna genomföra jämförelsen måste dessa talpar grupperas på lämpligt sätt. Som utgångspunkt valdes de tretton punkterna i A30-regulationen. Med hjälp av griddata-funktionen och metodangivelsen 'nearest!' i Matlab grupperas talparen efter den A30-mät punkt de ligger närmast i varvtals- vridmomentplanet (Figur 5). Ett problem uppstår dock vid indelningen av de punkter där momentet är negativt d.v.s. vid motorbromsning. Vid fördelningen har dessa punkter antagits vara närmast tomgångspunkten.



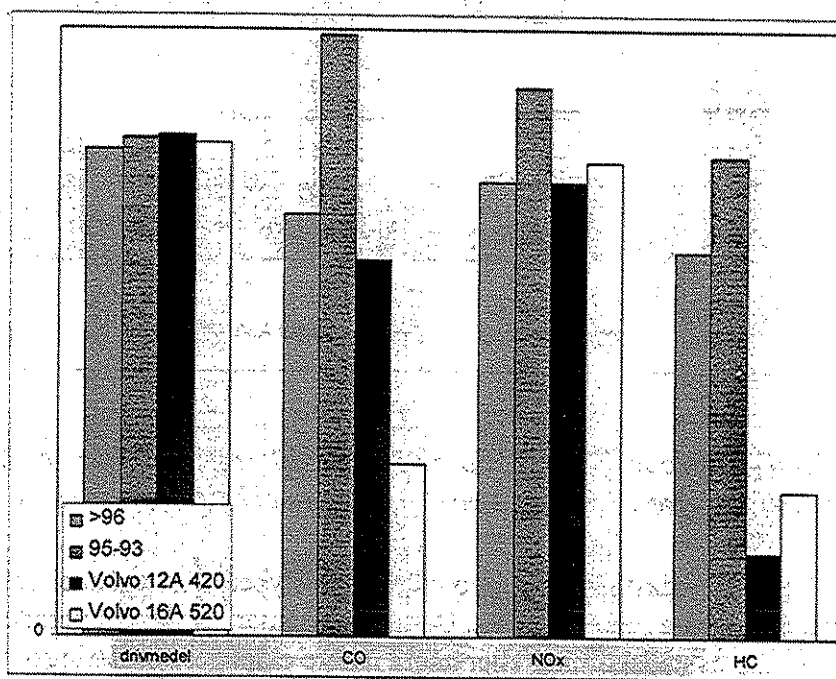
Figur 5. Fördelning av simulerade och uppmätta moment- varvtalspunkter

Förklaringsgraden hos de simulerade värdena är hög. R^2 -värdena är 95,8% och 96,2% med respektive utan accelerationer. Kvadratavvikelsen är 0,5% respektive 0,4%.

Det fanns ingen tillgång till inspelade värden för lastbilstransporter. Lastbilmodellens rimlighet kan bedömas utifrån andra värden för utsläpp per tonkilometer.



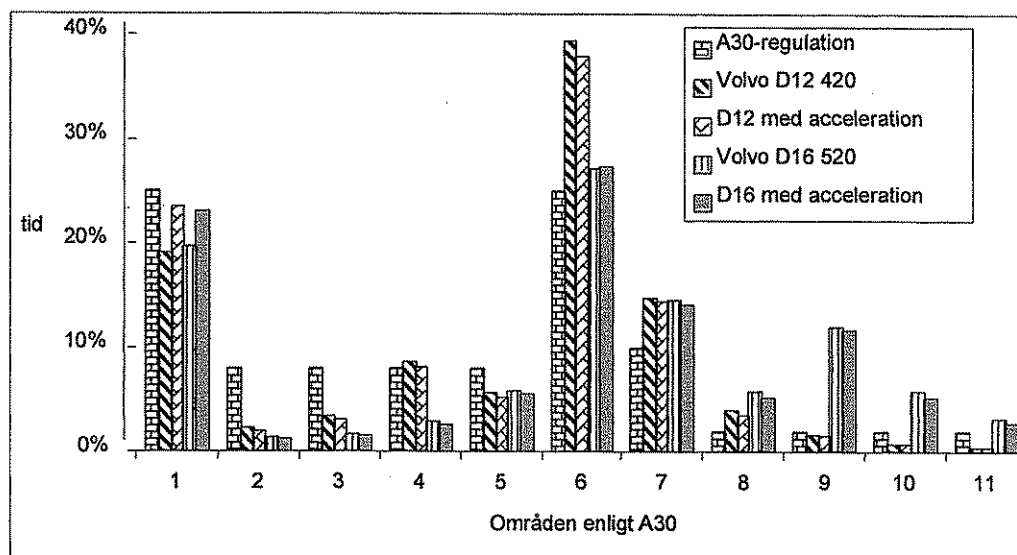
Figur 6. Jämförelse av utsläpp per ton och kilometer mellan lastbilmodellerna och ngm (1997)



Figur 7. Relativa skillnader i utsläpp och bränsleförbrukning per kWh mellan lastbilsmodellen och ngm(1997)

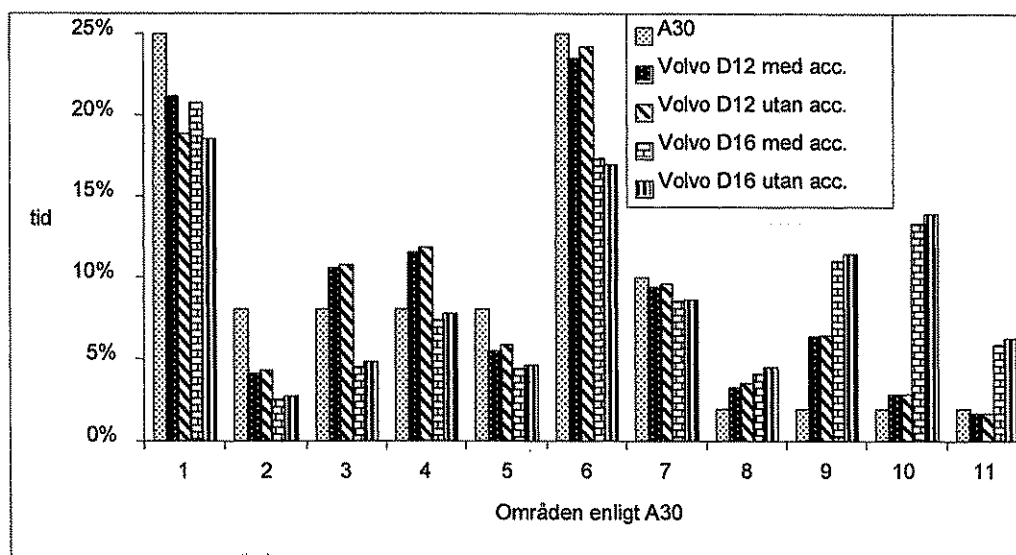
Som framgår av Figur 6 och Figur 7 finns det skillnader mellan uppgifterna från ngm (1997) och de värden som modellen genererar men dessa skillnader är relativt små jämfört med variationen i ngm's data. I Figur 6 jämförs max- och medelvärden för olika årsmodeller med genomsnittsvärden från simuleringssmodellen. Värdet på förbrukad energi per tonkilometer beräknas genom att bränsleförbrukningen multipliceras med 12,06 kWh/kg (ngm, 1997). I Figur 7 jämförs medelvärden för olika årsmodeller med medelvärdet av simuleringarna för de båda lastbilsmodellerna. Den klass av ämnen där skillnaden mellan ngm's och modellens värden är störst är HC. Detta beror troligtvis på att det är mycket stora skillnader mellan olika lastbilstyper.

Enligt Corretti m.fl. (1988) visar studier i bl.a. Sverige att vägningsfaktorerna i A30-regulationen stämmer väl överens med verkliga körmönster. Då punkterna i lastbilsmodellen delas upp efter den närmaste mätpunkten, där negativt moment höjs till tomgångsmomentet erhålls fördelningen i Figur 8.



Figur 8. Viktning av moment- varvtalspunkterna i A30-regulationen samt fördelningen enligt modellen för Volvo D12A och Volvo D16A med och utan acceleration.

Denna jämförelse är endast rättvisande om de lastbilstyper och vägsträckor som använts i modellen kan anses vara representativa. Detta är inte fallet då de simulerade värdena t.ex. inte innehåller någon stadskörning eller några lättare ekipage. Förklaringsgraden är inte lika hög som i traktor-fallet vilket nog till stor del beror på att A30-regulationen inte avser en transport som går att efterlikna. R^2 -värdena utan acceleration är 78,3% och 62,5% för Volvo D12 420 respektive Volvo D16 520 medan kvadratavvikelsen är 1,66% resp. 1,48%. R^2 -värdena med acceleration är 86,0% och 68,5% för Volvo D12 420 respektive Volvo D16 520 och kvadratavvikelsen är 1,3% för båda. Överensstämmelsen är bäst då accelerationer utgör 15% resp. 13% av sträckan vilket ungefär motsvarar en start per sex km.



Figur 9. Jämförelse mellan viktningen enl. A30 och den genomsnittliga fördelningen enl. lastbilmodellen inklusive tom returtransport med containerbil

Vid jämförelsen i Figur 9 har en större del av transportspektrat inkluderats vilket leder till bättre överensstämmelse med A30-viktningen för Volvo D12. R^2 -värdena är 86,3% och 89,5% och kvadratavvikelsen 0,5% och 0,4% för serierna med respektive utan acceleration var mil. För Volvo D16 har överensstämmelsen istället försämrats. R^2 -värdena är 41,7% och 49,0% och kvadratavvikelsen 2,1% och 1,8% för serierna med respektive utan acceleration.

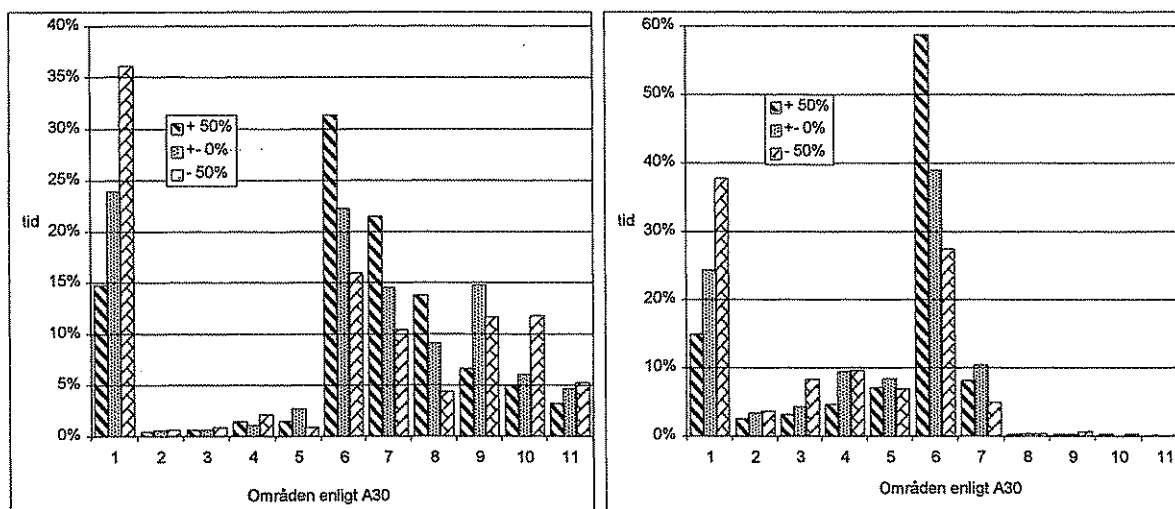
Slutsatserna av detta försök till validering är att det är önskvärt med ytterligare mätningar att validera mot men att modellerna, så vitt det går att bedöma från så få mätningar, ger en rimlig approximation av verkligheten.

3.5. Känslighetsanalys

Det är svårt att göra en rättvisande känslighetsanalys av modellerna. Detta beror på att de innehåller många diskontinuiteter bl.a. p.g.a. växlingen. När utväxlingen ändras förändras motorns varvtal och belastning mycket kraftigt vilket leder till förändrade utsläpp. De känslighetsanalyser som redovisas nedan skall främst ses som ett sätt att exemplifiera komplexiteten i den något enklare lastbilmodellen. De parametrar som analyserats är rullmotståndskoefficienten och den totala fordonsmassan. Under känslighetsanalysen har alla transporter skett på väg 569 utan ytterligare accelerationer.

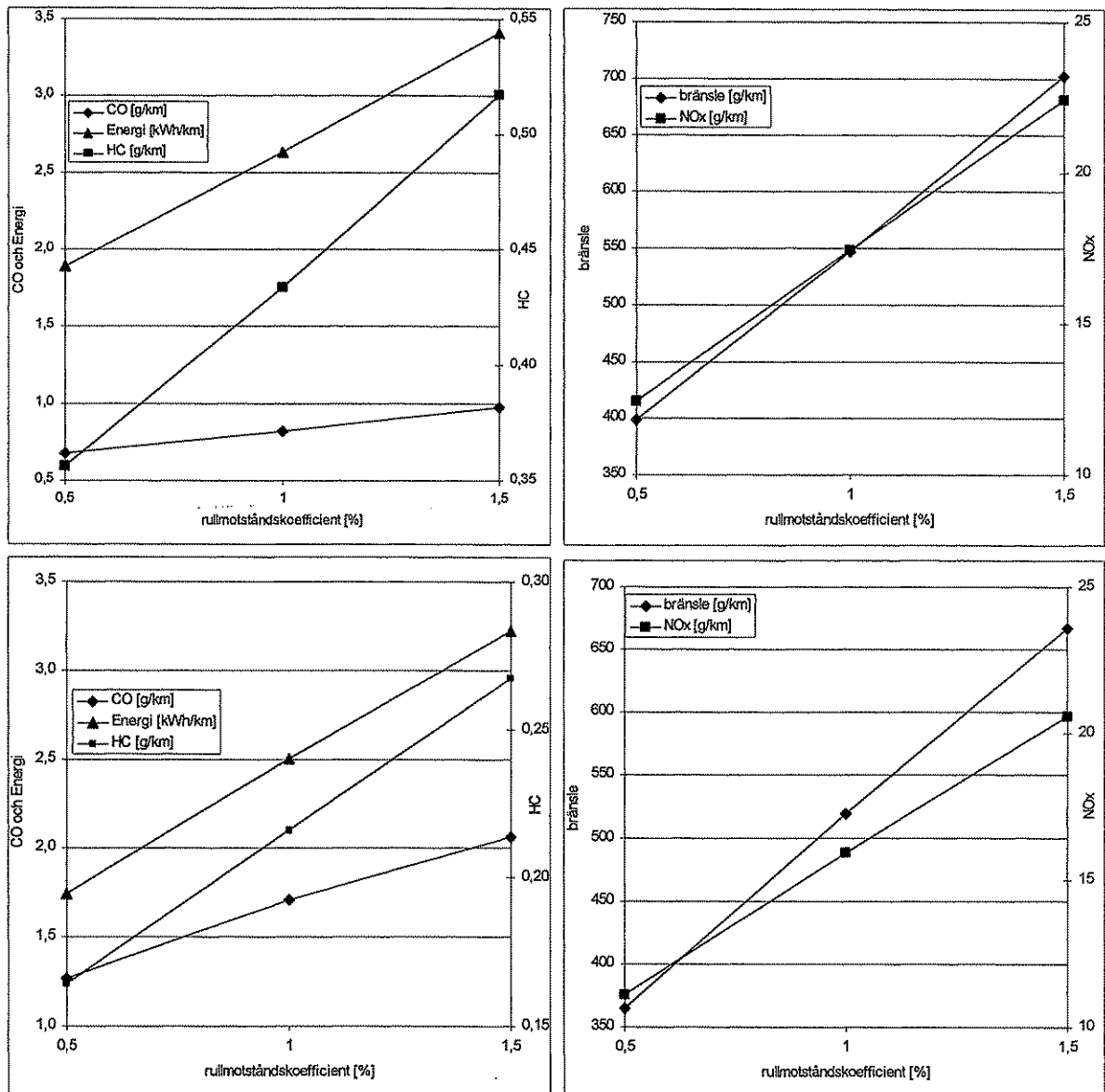
3.5.1. Rullmotståndskoefficient

Vid förändringar i rullmotståndskoefficienten betar sig modellen på ett relativt förutsägbart sätt. I Figur 10 redovisas hur fördelningen av varvtals- momentpunkterna beror på rullmotståndskoefficienten.



Figur 10. Förändringar i fördelningen av moment- varvtalstälpare vid förändring av rullmotståndskoefficienten för Volvo D16 och Volvo D12.

För både Volvo D16 och Volvo D12 är tendensen relativt tydlig, högre rullmotståndskoefficient ger mer tid vid maximalt momentuttag och mindre tid vid tomgång/motorbroms. Detta stämmer väl med vad man intuitivt kan förvänta sig då ett statiskt motstånd så som rullmotståndet ökar. Skillnaden mellan D16 och D12 är att D16 tillbringar mer tid vid höga varvtal.

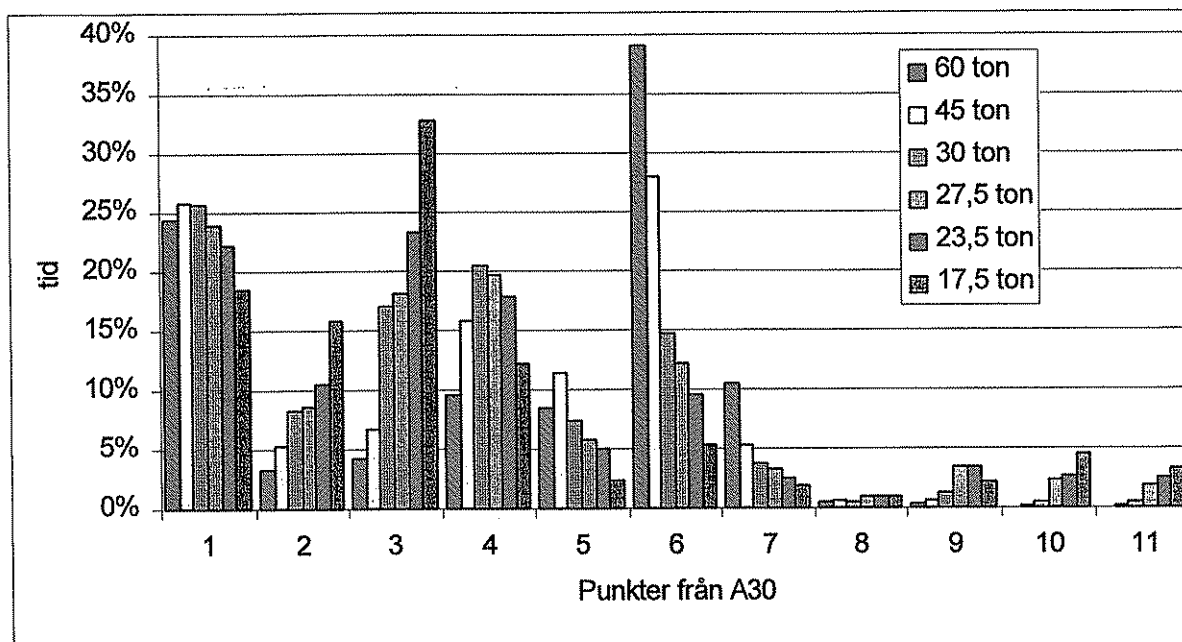
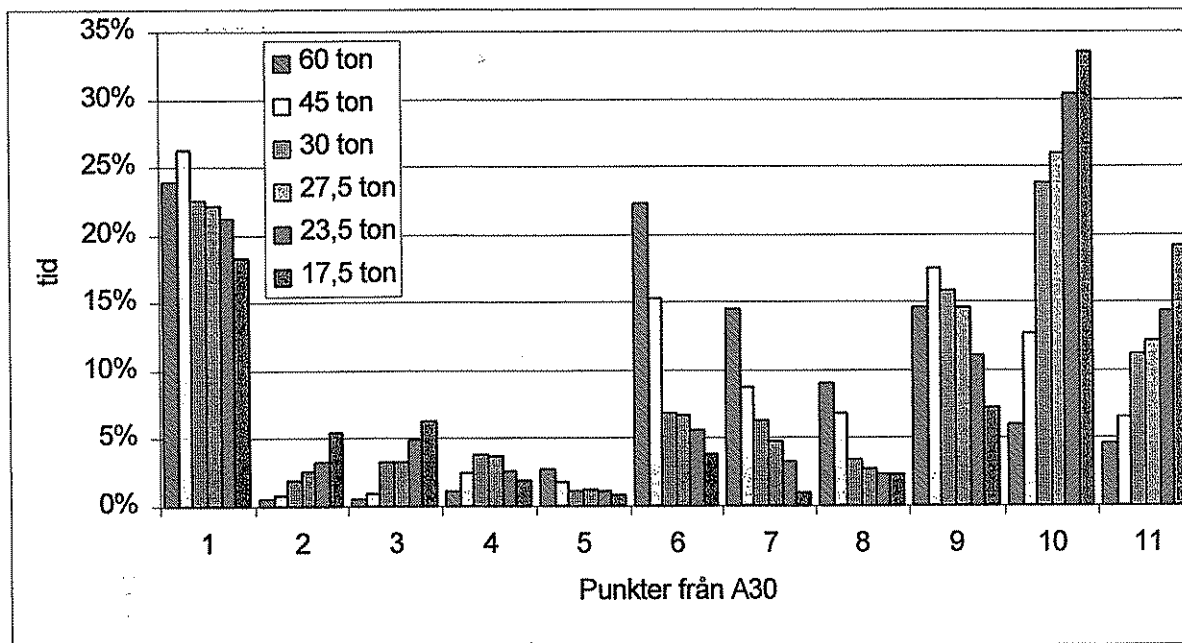


Figur 11. Utsläppens och bränsleförbrukningens beroende på rullmotståndskoefficienten för Volvo D16 (ovan) och Volvo D12

Enligt Figur 11 minskar alla utsläpp och bränsleförbrukningen approximativt linjärt med rullmotståndskoefficienten. Känsligheten hos Volvo D16 för bränsle, NOx och Energi är ca 57% medan CO och HC förändras ca 37% av förändringen i rullmotståndskoefficient. Motsvarande siffror för Volvo D12 är ca 60% respektive 47%.

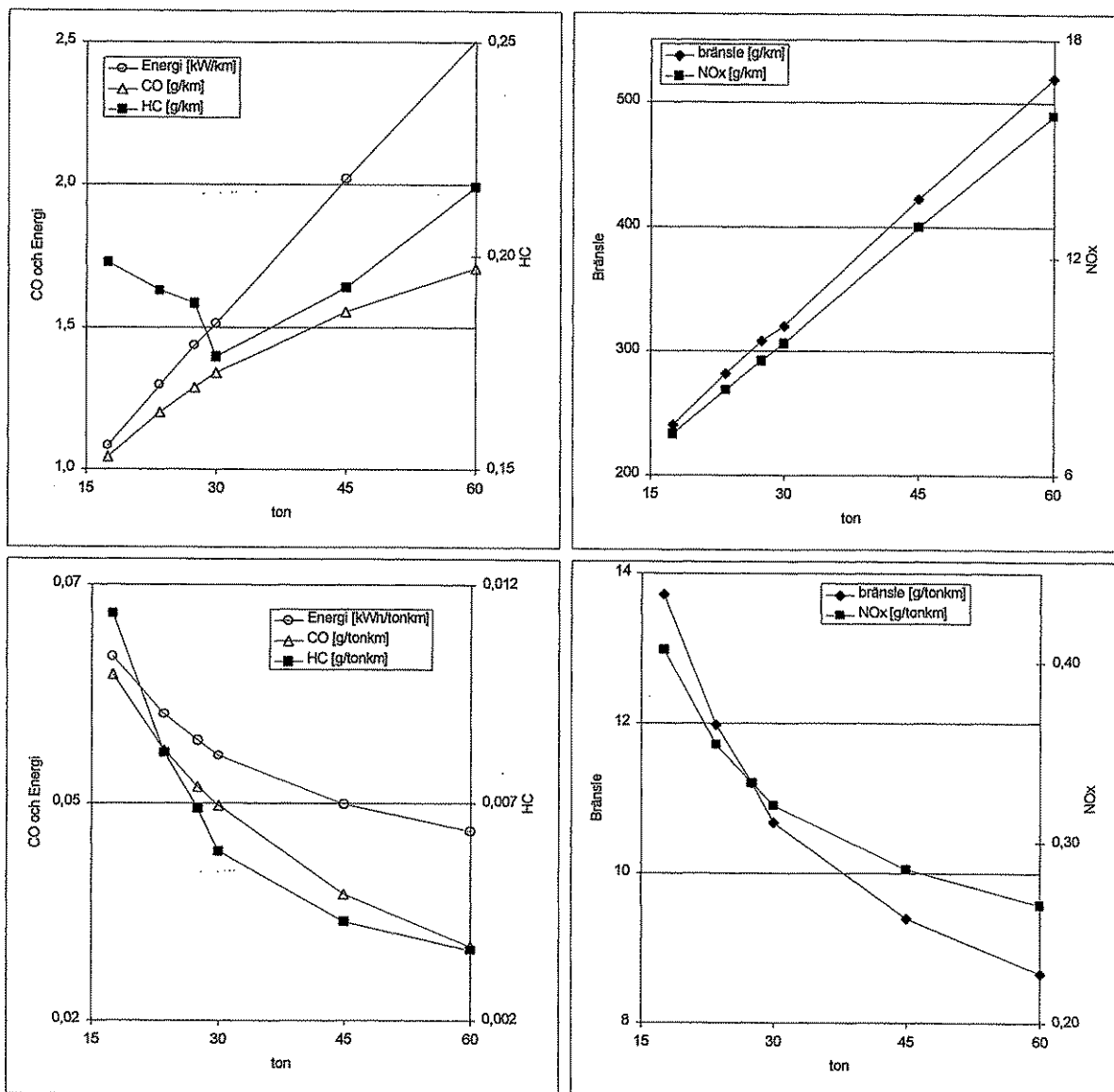
3.5.2. Fordonsmassa

Förändringar i fordonets massa påverkar energianvändningen vid acceleration och vid lägesförändringar. Massan påverkar även normalkraften på däckets som bestämmer rullmotståndet tillsammans med rullmotståndskoefficienten, sålunda borde förändringar i fordonets massa ha större påverkan på modellens beteende än förändringar i rullmotståndskoefficienten.



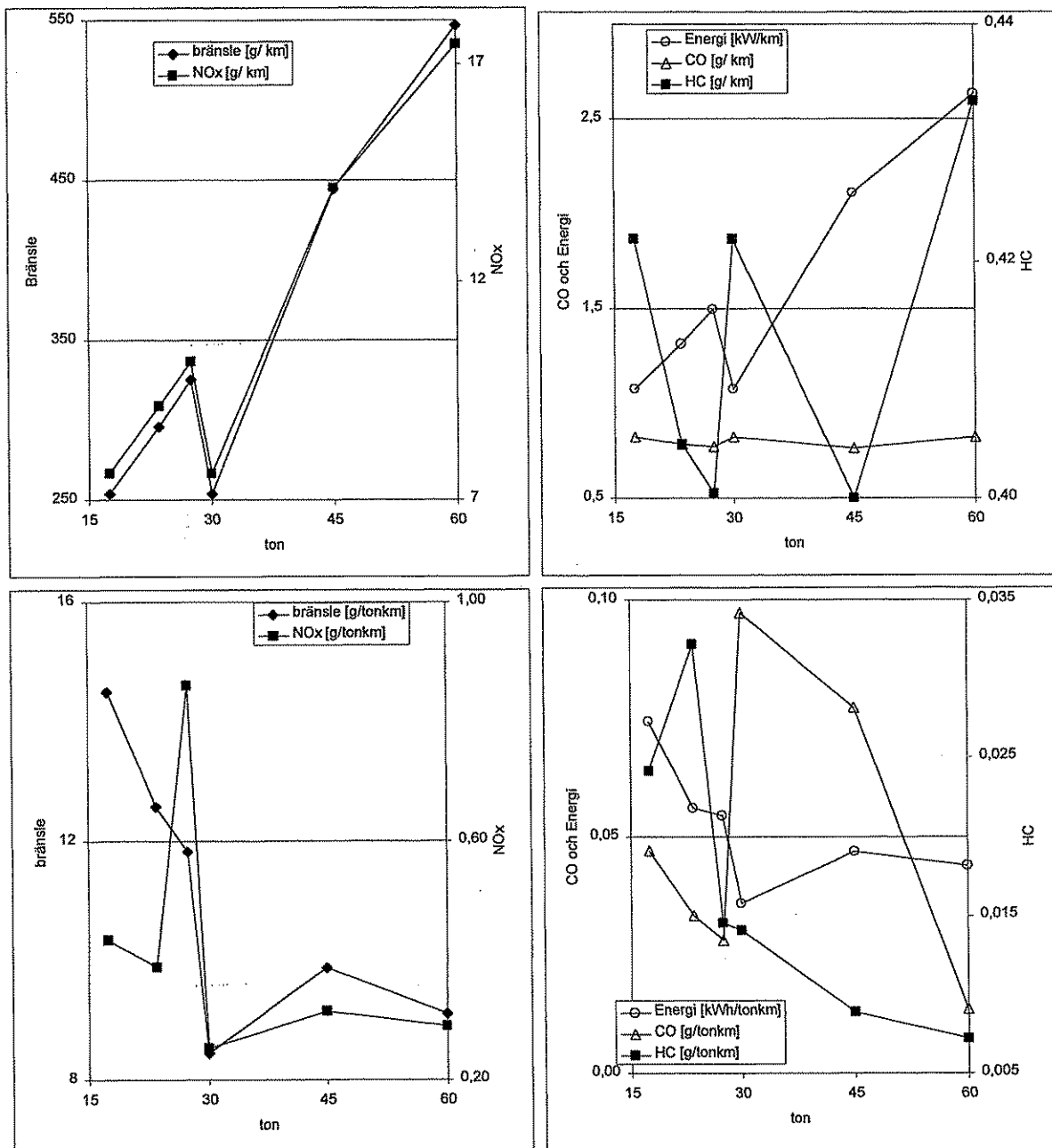
Figur 12. Moment- varvtalsfördelningens beroende på fordonsmassan för Volvo D16 (ovan) och Volvo D12

Som framgår av Figur 12 är inte sambandet mellan moment- varvtalsfördelningen och fordonets massa lika entydigt som förhållandet till rullmotståndskoefficienten. Visserligen är tiden vid maxmoment längst vid störst massa men det är fordonet med den lägsta massan som tillbringar minst tid på tomgång/motorbroms. Detta kan tänkas bero på att högre massa ger högre tröghet och sålunda större behov av motorbroms samtidigt som det borde ta längre tid att accelerera fordonet från tomgång ju större massa det har. Å andra sidan påverkar ju fordonets massa även rullmotståndet vilket borde ge ett utseende enligt Figur 10. Det är kombinationen av dessa och andra faktorer som ger Figur 12 dess utseende.



Figur 13. Utsläpp och bränsleförbrukning som funktion av fordonets totala massa uttryckt per kilometer respektive per tonkilometer för Volvo D12

Av Figur 13 framgår att utsläppen av NO_x och CO samt bränsleförbrukningen och energin från motorn per transporterad kilometer ökar ganska linjärt med ökad total massa. Utsläppskurvan per kilometer för HC har en lågpunkt vid 30 tons totalvikt. Denna lågpunkt syns inte i kurvorna över utsläpp per tonkilometer och totalt tonnage. Dessa kurvor har ingen linjär tendens utan uppvisar en avtagande lutning vid ökande total fordonsmassa.



Figur 14. Utsläpp och bränsleförbrukning som funktion av fordonets totala massa uttryckt per kilometer respektive per tonkilometer för Volvo D16

Utsläppen och bränsleförbrukningen hos Volvo D16 uppvisar inte något enkelt samband med fordonets totalmassa och att det är viktigt att simuleringarna görs med rätt massa för att modellen ska generera korrekta resultat. Att det är så stora skillnader mellan Volvo D12 och Volvo D16 beror troligtvis på att D12 använder 14 växlar medan D16 endast använder 8. Detta gör att Volvo D16 växlar i större steg vilket leder till att moment och varvtal påverkas mer. Även D12 innehåller dessa diskontinuiteter men de ligger troligtvis närmare varandra och har lägre amplitud. Det är viktigt att ha i åtanke att de samband som visas här inte gäller generellt för modellen utan beror på faktorer så som hastighetsbegränsningar och lutningar på den aktuella vägsträckan.

3.6. Beräknade värden för bränsleförbrukning och emissioner

Nedan redovisas tabeller med simuleringsresultat från de olika scenarier som studerats. De redovisade värdena är medelvärden över samtliga simulerade sträckor.

Tabell 1. Full last, landsväg, traktor

	Valmet 420DS	med acc.
Bränsle, g/km	334,59	338,15
CO, g/km	0,88	0,88
NO _x , g/km	11,62	11,80
HC, g/km	0,31	0,31
Energi, kWh/km	1,47	1,49
Nyttolast, ton	20,00	20,00
bränsle, g/ton km	16,729	16,908
CO, g/ton km	0,044	0,044
NO _x , g/ton km	0,581	0,590
HC, g/ton km	0,015	0,015
Energi, kWh/ton km	0,074	0,075

Tabell 2. Full last, landsväg, containerbil

	Volvo 12A 420	med acc.	Volvo 16A 520	med acc.
Bränsle, g/km	521,71	558,54	534,46	569,62
CO, g/km	1,58	1,68	0,75	0,80
NO _x , g/km	15,80	16,93	17,21	18,27
HC, g/km	0,23	0,24	0,40	0,42
Energi, kWh/km	2,51	2,69	2,61	2,79
Nyttolast, ton	32,50	32,50	32,50	32,50
bränsle, g/ton km	16,053	17,186	16,445	17,527
CO, g/ton km	0,049	0,052	0,023	0,025
NO _x , g/ton km	0,486	0,521	0,530	0,562
HC, g/ton km	0,007	0,007	0,012	0,013
Energi, kWh/ton km	0,077	0,083	0,080	0,086

Tabell 3. Full last, landsväg, bulkbil

	Volvo 12A 420	med acc.	Volvo 16A 520	med acc.
Bränsle, g/ton km	14,293	15,303	14,643	15,606
CO, g/ton km	0,043	0,046	0,021	0,022
NO _x , g/ton km	0,433	0,464	0,472	0,501
HC, g/ton km	0,006	0,007	0,011	0,012
Energi, kWh/ton km	0,069	0,074	0,071	0,076

Tabell 4. Full last, landsväg, timmerbil

	Volvo 12A 420	med acc.	Volvo 16A 520	med acc.
Bränsle, g/ton km	12,276	13,142	12,576	13,403
CO, g/ton km	0,037	0,039	0,018	0,019
NO _x , g/ton km	0,372	0,398	0,405	0,430
HC, g/ton km	0,005	0,006	0,009	0,010
Energi, kWh/ton km	0,059	0,063	0,061	0,066

Tabell 5. Skogsväg, full last, containerbil

	Volvo 12A 420	med acc.	Volvo 16A 520	med acc.
Bränsle, g/km	774,15	775,53	730,89	732,90
CO, g/km	3,04	3,05	2,93	2,93
NO _x , g/km	20,67	20,74	20,91	20,98
HC, g/km	1,15	1,15	1,50	1,50
Energi, kWh/km	3,17	3,19	3,03	3,05
Nyttolast, ton	32,50	32,50	32,50	32,50
bränsle, g/ton km	23,820	23,862	22,489	22,551
CO, g/ton km	0,094	0,094	0,090	0,090
NO _x , g/ton km	0,636	0,638	0,643	0,646
HC, g/ton km	0,035	0,035	0,046	0,046
Energi, kWh/ton km	0,098	0,098	0,093	0,094

Tabell 6. Skogsväg, full last, bulkbil

	Volvo 12A 420	med acc.	Volvo 16A 520	med acc.
Bränsle, g/ton km	21,210	21,247	20,024	20,080
CO, g/ton km	0,083	0,083	0,080	0,080
NOx, g/ton km	0,566	0,568	0,573	0,575
HC, g/ton km	0,031	0,031	0,041	0,041
Energi, kWh/ton km	0,087	0,087	0,083	0,084

Tabell 7. Skogsväg, full last, timmerbil

	Volvo 12A 420	med acc.	Volvo 16A 520	med acc.
Bränsle, g/ton km	18,215	18,248	17,197	17,245
CO, g/ton km	0,072	0,072	0,069	0,069
NOx, g/ton km	0,486	0,488	0,492	0,494
HC, g/ton km	0,027	0,027	0,035	0,035
Energi, kWh/ton km	0,075	0,075	0,071	0,072

Tabell 8. Landsväg, utan last, traktor

	Valmet 420DS	med acc.
Bränsle, g/ton km	221,22	222,50
CO, g/ton km	1,06	1,06
NOx, g/ton km	5,91	5,98
HC, g/ton km	0,35	0,35
Energi, kWh/ton km	0,81	0,81

Tabell 9. Landsväg, utan last, containerbil

	Volvo 12A 420	med acc.	Volvo 16A 520	med acc.
Bränsle, g/ton km	317,73	334,56	320,65	337,70
CO, g/ton km	1,21	1,25	0,68	0,70
NOx, g/ton km	9,18	9,71	10,27	10,79
HC, g/ton km	0,21	0,22	0,36	0,37
Energi, kWh/ton km	1,47	1,56	1,50	1,59

Tabell 10. Landsväg, utan last, bulkbil

	Volvo 12A 420	med acc.	Volvo 16A 520	med acc.
Bränsle, g/ton km	291,14	305,70	293,83	308,57
CO, g/ton km	1,13	1,17	0,69	0,71
NOx, g/ton km	8,33	8,79	9,31	9,76
HC, g/ton km	0,22	0,22	0,36	0,37
Energi, kWh/ton km	1,34	1,41	1,36	1,43

Tabell 11. Landsväg, utan last, timmerbil

	Volvo 12A 420	med acc.	Volvo 16A 520	med acc.
Bränsle, g/ton km	252,91	263,81	253,89	265,00
CO, g/ton km	0,98	1,00	0,72	0,73
NOx, g/ton km	7,08	7,42	7,81	8,15
HC, g/ton km	0,23	0,24	0,37	0,38
Energi, kWh/ton km	1,13	1,18	1,14	1,19

Tabell 12. Skogsväg, utan last, containerbil

	Volvo 12A 420	med acc.	Volvo 16A 520	med acc.
Bränsle, g/ton km	450,18	451,27	406,08	407,13
CO, g/ton km	2,64	2,64	2,60	2,60
NOx, g/ton km	13,73	13,77	10,13	10,16
HC, g/ton km	1,19	1,19	1,32	1,32
Energi, kWh/ton km	1,41	1,42	1,41	1,42

Tabell 13. Skogsväg, utan last, bulkbil

	Volvo 12A 420	med acc.	Volvo 16A 520	med acc.
Bränsle, g/ton km	427,47	428,43	449,60	450,48
CO, g/ton km	2,68	2,68	3,51	3,51
NOx, g/ton km	13,44	13,48	10,74	10,77
HC, g/ton km	1,19	1,19	1,77	1,77
Energi, kWh/ton km	1,29	1,30	1,21	1,22

Tabell 14. Skogsväg, utan last, timmerbil

	Volvo 12A 420	med acc.	Volvo 16A 520	med acc.
Bränsle, g/ton km	451,84	452,56	400,82	401,51
CO, g/ton km	2,80	2,81	3,56	3,56
NOx, g/ton km	14,49	14,51	9,48	9,51
HC, g/ton km	1,08	1,08	1,80	1,80
Energi, kWh/ton km	1,52	1,52	0,91	0,91

4. Deloperationer som ingår i kraftvärmeverkets råvaruförsörjningssystem

För att beräkna de totala emissionerna som alstras av kraftvärmeverkets råvaruförsörjningssystem utvecklades en generell beräkningsmodell. Försörjningskedjorna är i modellen sammansatta av mindre operationer där varje del är kopplad till användningen av en viss maskintyp. För Salix ingår även odlingen av grödan som en deloperation eftersom emissionerna som alstras vid denna belastar den färdiga produkten. I Kapitel 4 beskrivs de olika deloperationerna medan Kapitel 5 beskriver de totala logistiksystem som är uppbyggda för respektive råvara. För arbetsmaskiner talas om G_{15} timmar (G_{15h}), vilket betyder arbetstimme där avbrott kortare än 15 minuter inte avräknats. Den tekniska utnyttjandegraden beskriver hur stor del av den schemalagda tiden som kan utnyttjas (G_{15} timmar/Schemalagd tid).

4.1. Maskiner och produktionsprocesser

4.1.1. Skotare

I beräkningsmodellen kan 3 typer av skotare för terrängtransport av Grot utnyttjas. Maskinernas egenskaper beskrivs i Tabell 15. Specifikationer och prestationer är hämtade från Brunberg et al. (1994).

Tabell 15. Egenskaper för skotare

Beteckning i modell	S1	S2	S3
Maskintyp	Skotare liten	Skotare medel	Skotare stor
Last, råton	5	6,7	8,3
Prestation, råton / G_{15h}			
vid 100 m terrängtrp	13	14,5	15,5
vid 300 m	8,5	10	11
vid 500 m	6,5	7,5	9
TU, %	80%	80%	80%
Effekt, kW	110	130	150
Bränsleförbr., l/ G_{15h}	8	10	12

4.1.2. Maskiner för flisningsoperationer

Den flisningsutrustning som utnyttjas i modellen har egenskaper enligt tabell 16. Specifikationer och prestationer är hämtade från Brunberg et al. (1994 och 1998).

Tabell 16. Egenskaper för flisningsutrustning

Beteckning i modell	Fh	Fa	Ft
Maskintyp	Flisskördare hygge	Flisare avlägg	Flisare terminal
Prestation, råton /G15h	5,6	14	42
TU%	80%	80%	80%
Effekt, kW	150	150	385
Bränsleförbr., l/G15h	15	20	32

4.1.3. Maskiner för lastningsoperationer

Den utrustning för lastning som utnyttjas i modellen har egenskaper enligt tabell 17. Specifikationer och prestationer är hämtade från Brunberg et al. (1994).

Tabell 17. Egenskaper för lastare

Beteckning i modell	FLa	FLt
Maskintyp	Flislastare avlägg	Flislastare terminal
Prestation, råton /G15h	60	90
TU%	80%	90%
Effekt kW	150	150
Bränsleförbr l/G15h	20	20

4.1.4. Salixproduktion

Operationerna som är kopplade till tillförseln av Salix (Tabell 18) till kraftvärmeverket är uppdelade i 3 delar; odling, skörd och lastning. Odlingsdelen är sedan i sin tur uppdelad dels på emissioner och energianvändning som är beroende av förbränning av diesel i odlingen (Sonesson, 1993), dels på effekter av tillsatser i odlingen. Dieselförbrukningsvärdet för produktion av Salix innefattar plantering, skötsel och uppbrytning av odlingen men inte skörd. I bränsleförbrukningsvärdet för skördaren ingår även en traktor med släp vilken kör bredvid skördaren. Emissionsvärdena för tillsatsen av näringsämnen i odlingen är beskriven i Kapitel 4.3.

Tabell 18. Egenskaper för operationer för Salix-produktion

Beteckning i modell	Spd	Ss	Sl
Maskintyp	Salix Odling (dieselförbrukn.)	Salix skördare+ traktor	Salix lastning
Prestation, råton /G15h		50	60
TU, %		80 %	80 %
Effekt, kW		260+100	150
Bränsleförbr, l/G15h		50+15	20
Bränsle, kg/ton	0,80		

4.2. Transportprocesser

Modellen möjliggör för närvarande att data från 7 olika fordon utnyttjas. Data finns för lastbilar med utrustning för container-, bulk- eller timmertransport. Varje lastbilstyp finns med 2 olika motorstorlekar. Dessutom finns data tillgängligt för en transportutrustning driven av en Valmet-traktor med 70 kW motoreffekt.

Modellen skiljer på transporter på mindre väg och på landsväg. Den skiljer också på körning med respektive utan last. Samtliga bränsle-data är beräknade med den nyutvecklade modell som beskrivs och testas i Kapitel 3. Data som utnyttjas finns beskrivna i Tabell 19. I beräkningarna har det antagits en genomsnittlig fyllnadsgrad på 90 % för alla transportfordon.

Tabell 19. Data för transportutrustning

Beteckning i modell	Lc1	Lc2	T	Lb1	Lb2	Lt1	Lt2
Fordonstyp	Volvo 12A Container	Volvo 16A 520 Container	Valmet 420DS	Volvo 12A 420 Bulk	Volvo 16A 520 Bulk	Volvo 12A 420 Timmer	Volvo 16A 520 Timmer
Full Skog							
Max. last, ton	32,50	32,50	20,00	36,50	36,50	42,50	42,50
Bränsle, g/km	775,5	732,9		775,5	732,9	775,5	732,9
Full Väg							
Max. last, ton	32,50	32,50	20,00	36,50	36,50	42,50	42,50
Bränsle, g/km	558,5	569,6	338,1	558,5	569,6	558,5	569,6
Tom Skog							
Bränsle, g/km	451,27	407,13		428,00	450,00	452,00	401,00
Tom Väg							
Bränsle, g/km	334,56	337,70	222,50	305,00	308,00	264,00	265,00

4.3. Emissionsdata

Emissionsfaktorerna som används för lastbilar finns beskrivna i Tabell 20. CO-, NOx- och HC-emissionerna är reglerade i olika Euro-klasser. Data för Euro 1-3 är hämtade från ntm (2000) och är uppskattade genomsnittsvärden. NOx-värdena som används i beräkningarna för Euro 4 och Euro 5 är beräknade från kommande gränsvärden enligt EU (direktiv 1999/96/EC). CO- och HC-värdena för Euro 4 och 5 är identiska med ntm-värdena för Euro 3 eftersom redan dessa värdena understiger de kommande lagkraven för Euro 4 och 5. Det antas att lastbilarna i det nuvarande systemet består av 1/3 av vardera Euro 0, 1 och 2.

Tabell 20. Emissionsfaktorer för lastbilar utformade för att uppfylla olika reningskrav.

Lagkrav	Euro 0	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5
Introduktion, år	1990	1992	1996	2000	2005	2008
CO, g/l	3,7	3,4	2,5	2,3	2,3	2,3
NOx, g/l	44	27	23	16	12,03	6,87
HC, g/l	2,1	1,8	1,3	1,3	1,3	1,3

Emissionsnivåerna för off-road maskiner (EU direktiv 97/68/EC) har varit begränsade under en tid och nu har dessa värden även börjat gälla för skogsmaskiner och traktorer (EU direktiv 2000/25/EC). Lagkraven implementeras i två steg enligt beskrivning i Tabell 21. För uppskattningen av emissionsnivåerna för de arbetsmaskiner som ingår i det nuvarande systemet har använts data från en av SNV-initierad svensk studie som uppskattade de genomsnittliga emissionsnivåerna för olika typer av fordon (Sigfridsson och Stenström, 1989). Värdena i Tabell 21 är medelvärden beräknade av värdena för skogsskördare och lastmaskiner. Vid omräkningen av värdena har antagits att den genomsnittliga termiska verkningsgraden är 30 % för de studerade motorerna. CO-värdena för steg 1 och 2 är identiska med värdet (4,0 g/kWh) som används för de nuvarande maskinerna eftersom redan detta värde understiger lagkraven för steg 1 och 2.

Tabell 21. Emissionsfaktorer för arbetsmaskiner. Siffrorna för steg 1 och 2 är för motorer i storlekarna 75-130 kW, data för övriga storlekar avviker något från dessa värden.

	SNV (1989)	Steg 1 reglering	Steg 2 reglering
Introduktion, år		1999	2003
CO, g/kWh	4,0	5,0 (4,0)	5,0 (4,0)
NOx, g/kWh	15	9,2	6,0
HC, g/kWh	1,4	1,3	1,0

För samtliga maskiner har det antagits att produktionen av CO₂ uppgår till 74,6 g/MJ i bränslet. Denna siffra är kopplad till mängden kol i bränslet och är i princip oberoende av motorernas utformning.

Sverige använder bränsle med mycket låga svavelhalter. Det har antagits att arbetsmaskinerna i det nuvarande systemet drivs med dieselolja med 0,05 % Svavel som ger emissionerna 1 g SO₂/kg bränsle och lastbilarna med MK1 diesel med 10 ppm svavel som ger 0,02 g SO₂/kg bränsle. Bränslenas innehåll av svavel är max-värden och de verkliga siffrorna ligger enligt ntm (2000) ännu lägre.

Tabell 22 beskriver emissionerna orsakade av produktionen av konstgödseln som använts i produktionen av Salix. Det har antagits att 1200 kg NPK 23:3:10 sprids över ett 4-årigt omdrev. Denna giva uppfyller inte riktigt gödslingsrekommendationerna på 80 kg N, 10 kg P och 30 kg K per år. I flera områden gödslas dock inte salixen år 3 och 4 i omdrevet, och i sådana fall kan den beskrivna givan spridas på 2 år utan att riskerna för kväveurlakning blir för omfattande. Användningen av andra tillsatser är liten och har försumrats i beräkningarna. Värdena är beräknade från data redovisade av Davis och Haglund (1999). Vid beräkningarna har det antagits en skörd på 30 ton TS det första omdrevet och sedan 40 ton TS per hektar de följande 5 omdreven.

Tabell 22. Emissionsvärden och energianvändning orsakad av produktionen av konstgödsel använd vid odlingen av Salix, uttryckt i g/ton Salix med 50 % vattenhalt.

CO ₂ , g/ton	10142
SO ₂ , g/ton	30,1
CO, g/ton	2,43
NO _x , g/ton	21,1
HC, g/ton	0,00
Energi, kWh/ton	38,9

5. Beskrivning av nuvarande tillförselsystem

Kapitlet beskriver de tillförselsystem som i huvudsak utnyttjas för de olika råvarorna. I systemen ingår ett antal operationer som har givits förkortande beteckningar enligt nedan:

Sg	Skotning Grot
Fh	Flisning på hygget
Fa	Flisning på avlägg
Ft	Flisning på terminal
Vat	Vidaretransport skog - terminal
Vav	Vidaretransport skog - värmeverk
Vtv	Vidaretransport terminal - värmeverk
Våv	Vidaretransport åker - värmeverk
Vsv	Vidaretransport sågverk - värmeverk
Hs	Skördning salix
Lfa	Lastning flis avlägg
Ls	Lastning salix bilväg
Lft	Lastning flis terminal
Ps	Produktion (odling) salix

5.1. Råvarumängder

Kraftvärmeverket antas att under det studerade året utnyttja råvaror enligt Tabell 23. Siffrorna är uppskattade av företaget som sköter tillförseln av råvaror till anläggningen.

Tabell 23. Kraftvärmeverkets råvaruförsörjning

	Grot direkt	Grot term.	Rötved	Sågspån	Torrflis	Bark	Salix	Råflis	Summa
Mängd tTS	18 200	7 200	3 000	9 400	3 700	10 600	4 500	800	57 400

Anm. Grot term betecknar Grot som fraktats över terminal.

5.2. Grot

5.2.1. Direkt transport till anläggningen

Grot benämner avverkningsrester (GRenar Och Toppar) från normal avverkning. I all huvudsak är det efter slutavverkning som detta tillvaratagande sker. Efter att den ordinarie avverkningen är avslutad sker en hopsamling med skotare av avverkningsavfallet, varefter det läggs i vältor. Vältornas funktion är tvåfald, dels sker en uttorkning av materialet och dels sker en avbarrning varvid de flesta näringsämnen återförs till skogsmarken. Flisning av Grot sker vid avlägg och transport av flisen till värmeverk sker med flisbil. Övriga data finns beskrivna i Tabell 24.

Tabell 24. Egenskaper för transportkedjan för Grot som fraktas direkt till anläggningen

Operation	1. Sg	2. Fa	3. Vav
Fordon	S1	Fa	Lb1
Andel	100%	100%	100%
Mängd, tTS	18 200	18 200	18 200
Vattenhalt	40%	35%	35%
Mängd, ton	30 333	28 000	28 000
Skog last, km			10
Väg last, km			55
Skog tom, km			10
Väg tom, km			55

5.2.2. Transport över terminal

Modellen skiljer på Grot som flisas vid avlägget och Grot som flisas på hygget. Modellen ger även möjlighet att definiera hur stor del av råvaran som flisas vid respektive ställe. För Grot som flisas vid avlägg och transporteras över terminal beskrivs övriga data i Tabell 25. För Grot som flisas på hygget beskrivs övriga data i Tabell 26.

Tabell 25. Egenskaper för transportkedjan för Grot som flisas vid avlägg och fraktas över terminal

Operation	1. Sg	2. Fa	3. Vat	4. Lft	5. Vtv
Fordon	S1	Fa	Lb1	FLt	Lb1
Andel	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %
Mängd, tTS	360	360	360	360	360
Vattenhalt	40%	35%	35%	35%	35%
Mängd, ton	600	554	554	554	554
Skog last, km			10		0
Väg last, km			30		30
Skog tom, km			10		0
Väg tom, km			30		30

Tabell 26. Egenskaper för transportkedjan för Grot som flisas på hygget och fraktas över terminal

Operation	1. Fh	2. Vat	3. Lft	4. Vtv
Fordon	Fh	Lc1	FLt	Lb1
Andel	95 %	95 %	95 %	95 %
Mängd, tTS	6 840	6 840	6 840	6 840
Vattenhalt	40%	40%	35%	35%
Skog last, km		10		0
Väg last, km		30		30
Skog tom, km		10		0
Väg tom, km		30		30

5.3. Rötved

Den rötved som utnyttjas som energiråvara antas transporteras med timmerbil till terminal för att flisas och sedan lastas på bulkbil för transport till värmeverket. Övriga beräkningsdata beskrivs i Tabell 27.

Tabell 27. Egenskaper för tillförselkedjan för rötved

Operation	1. Vat	2. Ft	3. Lft	4. Vtv
Fordon	Lt1	FSt	FLt	Lb1
Mängd tTS	3 000	3 000	3 000	3 000
Vattenhalt	50 %	30 %	30 %	30 %
Mängd ton	6 000	4 286	4 286	4 286
Skog last, km				0
Väg last, km	75			45
Skog tom, km				0
Väg tom, km	75			45

5.4. Övriga biprodukter

För tillförseln av sågspån, bark, torrflis och råflis antas att den huvudsakliga miljöbelastningen orsakas av transporten till värmeverket. Produkterna är restprodukter från annan tillverkning, främst från sågverk, och de tidigare leden i livscykeln antas därför inte belasta kraftvärmeproduktionen. Skillnaden mellan råflis och torrflis är att råflisen kommer från bakar m.m. i sågprocessen, medan torrflisen är från den justering som sker efter torkning. Torrflisen har därför en mycket lägre fukthalt än råflisen, vilken också innehåller en betydande andel bark. Övriga beräkningsdata framgår ur Tabell 28.

Tabell 28. Egenskaper för tillförselkedjorna för sågspån, bark, torrflis och råflis.

Material	Sågspån	Bark	Torrflis	Råflis
Operation	1. Vsv	1. Vsv	1. Vsv	1. Vsv
Fordon	Lb1	Lb1	Lb1	Lb1
Mängd tTS	9 400	10 600	3 700	800
Vattenhalt	53%	55%	15%	53%
Mängd ton	20 000	23 556	4 353	1 702
Skog last, km	0	0	0	0
Väg last, km	35	35	35	35
Skog tom, km	0	0	0	0
Väg tom, km	35	35	35	35

5.5. Salix

Ett flertal tillförselkedjor kan utnyttjas för Salix. Det har här antagits att en traktordriven släpvagn körs bredvid skördaren och att vagnen sedan tippas direkt i container (50 %) eller tippas på mark för att sedan lastas i container (50 %). Övriga beräkningsdata framgår ur Tabell 29. Modellen ger direkt möjlighet att definiera hur stor andel av råvaran som transporteras med traktor- respektive lastbilssläp. I grundscenariot antas att all transport sker med lastbil.

Tabell 29. Egenskaper för tillförselkedjan av Salix-flis

Operation nr	1. Ps	2. Hs	3. Ls	4. Våv	5. Våv
Fordon		Ss	Sl	T	Lc1
Andel	100%	100%	50%	0%	100%
Mängd, tTS	4 500	4 500	2 250	0	4 500
Vattenhalt	50%	50%	50%	50%	50%
Mängd, ton	9 000	9 000	4 500	0	9 000
Skog last, km				0	0
Väg last, km				30	30
Skog tom, km				0	0
Väg tom, km				30	30

6. Energianvändning och emissioner orsakade av nuvarande råvaruförsörjningsystem

Tabell 30-31 redovisas emissioner och bränsleförbrukning som orsakas av råvarutransporterna till kraftvärmeverket. Tabell 30 redovisar totala värden för respektive produktslag, medan Tabell 31 redovisar värden per ton TS i bränslet. Resultaten i Kapitel 6 och 7 är redovisade med varierande antal värdesiffror. Det bör uppmärksammas att resultatens verkliga noggrannhet sällan överstiger 2 värdesiffror.

Tabell 30. Totala emissioner och bränsleförbrukning vid nuvarande råvarusammansättning

	GROT direkt	GROT term	Rötved	Sågspån	Torrflis	Bark	Salix	Råflis	Totalt
Bränsle, kg	107 363	52 975	18 231	18 401	4 005	21 673	26 367	1 566	250 579
CO ₂ , kg	342 796	169 142	58 208	58 753	12 787	69 198	175 463	5 000	891 347
SO ₂ , kg	58	29	4	0	0	0	289	0	381
CO, kg	1 004	500	107	71	16	84	312	6	2 101
NO _x , kg	4 954	2 451	746	698	152	822	1 473	59	11 355
HC, kg	389	193	48	39	8	45	108	3	834
Energi, KWh	1 276 421	629 810	216 740	218 770	47 615	257 662	663 252	18 619	3 328 890

Tabell 31. Totala emissioner och bränsleförbrukning vid nuvarande råvarusammansättning beräknade per ton TS

	GROT direkt	GROT term	Rötved	Sågspån	Torrflis	Bark	Salix	Sågverks- flis
Bränsle, g	5 899	7 358	6 077	1 958	1 082	2 045	5 859	1 958
CO ₂ , g	18 835	23 492	19 403	6 250	3 456	6 528	38 992	6 250
SO ₂ , g	3,17	4,01	1,26	0,04	0,02	0,04	64,30	0,04
CO, g	55,2	69,5	35,6	7,6	4,2	7,9	69,4	7,6
NO _x , g	272,2	340,4	248,6	74,3	41,1	77,6	327,2	74,3
HC, g	21,39	26,85	16,11	4,11	2,27	4,29	23,95	4,11
Energi, KWh	70	87	72	23	13	24	147	23

För produkterna sågspån, torrflis, bark och råflis är hela den redovisade miljöbelastningen beroende på transporten av produkten till kraftvärmeverket. För Grot tillförd med de tre beskrivna systemen framgår miljöbelastningens uppdelning över olika operationer av Tabell 32-34.

Tabell 32. Miljöbelastningens uppdelning över olika operationer för Grot som transporteras direkt till värmeverket (angivna per ton TS)

Operation	Sg	Fa	Vsi	TOTAL
Bränsle, kg	1,29	1,81	2,78	5,89
CO ₂ , kg	4,13	5,79	8,90	18,83
SO ₂ , kg	0,00130	0,00182	0,00006	0,00317
CO, kg	0,0184	0,0259	0,0108	0,0552
NO _x , kg	0,0693	0,09712	0,1057	0,272
HC, kg	0,00647	0,00906	0,00585	0,02139
Energi, KWh	15,40	21,58	33,14	70,13

Tabell 33. Miljöbelastningens uppdelning över olika operationer för Grot som hanteras över terminal och flisas vid avlägg (angivna per ton TS)

Operation	Sg	Fa	Vat	Lft	Vtv	TOTAL
Bränsle, kg	1,296	1,815	1,777	0,282	1,213	6,384
CO ₂ , kg	4,137	5,796	5,673	0,902	3,874	20,382
SO ₂ , kg	0,001	0,002	0,000	0,000	0,000	0,003
CO, kg	0,018	0,026	0,007	0,004	0,005	0,060
NO _x , kg	0,069	0,097	0,067	0,015	0,046	0,295
HC, kg	0,006	0,009	0,004	0,001	0,003	0,023
Energi, KWh	15,404	21,583	21,126	3,357	14,424	75,894

Tabell 34. Miljöbelastningens uppdelning över olika operationer för Grot som flisas på hygget och hanteras över terminal (angivna per ton TS)

Operation	Fh	Vat	Lft	Vtv	TOTAL
Bränsle, kg	3,68	2,22	0,282	1,21	7,41
CO ₂ , kg	11,77	7,10	0,90	3,87	23,65
SO ₂ , kg	0,0036	4,45E-05	0,000282	2,43E-05	0,004039
CO, kg	0,0526	0,0086	0,0040	0,0047	0,06996
NOx, kg	0,197	0,084	0,015	0,046	0,342
HC, kg	0,0184	0,0046	0,0014	0,0025	0,0270
Energi, KWh	43,84	26,46	3,35	14,42	88,08

7. Möjliga förändringar av logistiksystemet och resulterande miljöbelastning

7.1. Allmän känslighetsanalys

Det är i flera fall svårt att exakt uppskatta den genomsnittliga kapaciteten för de arbetsmaskiner som ingår i det studerade systemet. Tabell 35 redovisar de relativa förändringarna i de olika resultatparametrarna om det antas att kapaciteten för alla arbetsmaskiner ökar med 10 % jämfört med de värden som tidigare angivits.

Transportutrustningens kapacitet har inte förändrats i analysen.

Tabell 35. Relativa förändringar i miljöbelastningen om kapaciteten för alla arbetsmaskiner ökar med 10 %.

	GROT direkt	GROT term	Rötved	Sågspån	Torrflis	Bark	Salix	Råflis	Totalt
Bränsle	0,952	0,951	0,983	1,000	1,000	1,000	0,962	1,000	0,964
CO ₂	0,952	0,951	0,983	1,000	1,000	1,000	0,982	1,000	0,968
SO ₂	0,911	0,911	0,916	1,000	1,000	1,000	0,997	1,000	0,976
CO	0,927	0,926	0,958	1,000	1,000	1,000	0,955	1,000	0,939
NOx	0,944	0,944	0,977	1,000	1,000	1,000	0,964	1,000	0,957
HC	0,934	0,933	0,967	1,000	1,000	1,000	0,954	1,000	0,946
Energi	0,952	0,951	0,983	1,000	1,000	1,000	0,982	1,000	0,968

Även uppskattningen av de involverade materialens vattenhalt vid de olika operationerna kan vara något osäker. Tabell 36 redovisar de relativa förändringarna i de olika resultatparametrarna om det antas att materialens fukthalt i alla steg reduceras med 10 % jämfört med de värden som tidigare angivits.

Tabell 36. Relativa förändringar i miljöbelastningen om fukthalten för alla material reduceras med 10 % av det tidigare uppgivna värdet.

	GROT direkt	GROT term	Rötved	Sågspån	Torrflis	Bark	Salix	Råflis	Totalt
Bränsle	0,946	0,940	0,932	0,904	0,983	0,891	0,909	0,904	0,933
CO ₂	0,946	0,940	0,932	0,904	0,983	0,891	0,909	0,904	0,930
SO ₂	0,944	0,939	0,956	0,904	0,983	0,891	0,909	0,904	0,917
CO	0,945	0,939	0,941	0,904	0,983	0,891	0,909	0,904	0,935
NOx	0,946	0,940	0,934	0,904	0,983	0,891	0,909	0,904	0,933
HC	0,945	0,939	0,938	0,904	0,983	0,891	0,909	0,904	0,934
Energi	0,946	0,940	0,932	0,904	0,983	0,891	0,909	0,904	0,930

7.2. Effekter av strängare emissionskrav

Enligt beskrivning i Kapitel 4.3 kommer kraven på emissionsnivåerna för både arbetsmaskiner och transportfordon att bli strängare de kommande åren. Emissionsvärden har beräknats för 4 olika scenarion (Tabell 37). Scenario 1 är dagens system. För Scenario 2 har det antagits att alla lastbilar har Euro 3 motorer medan all arbetsmaskiner har motorer som uppfyller steg 1 regleringarna. För scenario 3 har det antagits att alla lastbilar har Euro 5 motorer och arbetsmaskinerna steg 2 motorer. Dessa värden är också antagna för Scenario 4, men här har det dessutom antagits en möjlig 10-procentig minskning av bränsleförbrukningen orsakad av förbättrad effektivitet och/eller förbättrat bränsleutnyttjande. Emissionsvärdena för produktionen av konstgödseln till Salixodlingen har varit konstanta i alla scenarion.

Tabell 37. Totala belastningsnivåer beräknade för 4 olika scenarion för maskinernas emissionsnivåer.

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scen.4 /Scen 1
Diesel, kg	4,36	4,36	4,36	3,93	0,90
CO ₂ , kg	15,52	15,52	15,52	14,16	0,91
CO, kg	0,0366	0,0339	0,0339	0,0307	0,84
NOx, kg	0,1978	0,1128	0,0639	0,0581	0,29
HC, kg	0,0145	0,0126	0,0106	0,0096	0,66
Energi, kWh	57,99	57,99	57,99	52,93	0,91

7.3. Effekter av reducerade transportavstånd

Ett mera effektivt utnyttjande av befintliga tillgångar av material som kan användas som bränsle i kraftvärmeverket kan leda till att de genomsnittliga transportavstånden reduceras. Det har här antagits att alla avstånd har reducerats med 10 km. Vid terminalhantering har avstånden från terminalen kortats, vid transporter sammansatta av både skogs- och landsvägstransporter så har landsvägsavstånden kortats med 10 km. Tabell 38 redovisar de relativa förändringarna i resultatparametrarna när transportavstånden kortas.

Tabell 38. Relativa förändringar i miljöbelastningen om alla transportavstånd reduceras med 10 km.

	GROT direkt	GROT term	Rötved	Sågspån	Torrflis	Bark	Salix	Råflis	Totalt
Bränsle	0,93	0,95	0,94	0,71	0,71	0,71	0,90	0,71	0,89
CO ₂	0,93	0,95	0,94	0,71	0,71	0,71	0,95	0,71	0,90
SO ₂	1,00	1,00	0,99	0,71	0,71	0,71	1,00	0,71	1,00
CO	0,97	0,98	0,96	0,71	0,71	0,71	0,97	0,71	0,95
NO _x	0,94	0,95	0,94	0,71	0,71	0,71	0,93	0,71	0,91
HC	0,96	0,97	0,95	0,71	0,71	0,71	0,95	0,71	0,93
Energi	0,93	0,95	0,94	0,71	0,71	0,71	0,95	0,71	0,90

7.4. Effekter av ökade möjligheter att utnyttja returtransporter

Genom att utnyttja returkörningarna av de tomma lastbilarna till att utföra annat transportarbete kan miljöbelastningen som alstras delas upp på flera produkter och den del som belastar produktionen av el och värme minskas. I Tabell 39 har det antagits att 50 % av alla returtransporter på landsväg kan utnyttjas för andra varor. För Grot som hanteras över terminal är det bara transporterna mellan terminalerna och kraftvärmeverket som antas kunna utnyttjas. Tabellen redovisar de relativa förändringarna jämfört med scenariot utan returtransporter.

Tabell 39. Relativa förändringar i miljöbelastningen om 50 % av returtransporterna kan användas för andra produkter.

	GROT direkt	GROT term	Rötved	Sågspån	Torrflis	Bark	Salix	Råflis	Totalt
Bränsle	0,93	0,97	0,87	0,82	0,82	0,82	0,94	0,82	0,92
CO ₂	0,93	0,97	0,87	0,82	0,82	0,82	0,97	0,82	0,93
SO ₂	1,00	1,00	0,99	0,82	0,82	0,82	1,00	0,82	1,00
CO	0,97	0,99	0,91	0,82	0,82	0,82	0,98	0,82	0,96
NOx	0,95	0,98	0,88	0,82	0,82	0,82	0,96	0,82	0,93
HC	0,96	0,98	0,89	0,82	0,82	0,82	0,97	0,82	0,95
Energi	0,93	0,97	0,87	0,82	0,82	0,82	0,97	0,82	0,93

7.5. Effekter av ökad andel traktortransporter

Under vissa perioder under året har lantbrukarna i området ledig arbets- och maskinkapacitet som kan utnyttjas för transport av biobränslen. Främst kan denna kapacitet utnyttjas för transport av Salix och speciellt i fall när Salixen produceras på den egna gården kan man finna flera fördelar med att lantbrukarna själva sköter transportererna. Tabell 40 redovisar den relativa förändringen i miljöbelastningen för Salix-systemet om det antas att 100 % av transportererna sker med den traktordrivna transportutrustning som behandlas i Kapitel 3.

Tabell 40. Relativa förändringar i miljöbelastningen om 100 % av Salix-transporterna utförs med traktorslöp.

	Salix trpt.	Salix total
Bränsle	1,02	1,01
CO ₂	1,02	1,00
CO	0,911	0,991
NOx	0,852	0,968
HC	0,572	0,931
Energi	1,02	1,00

7.6. Effekter av ökad Salixanvändning

Möjligheter att öka odlingen av Salix finns om de ekonomiska förutsättningarna är de rätta och de förbränningstekniska frågorna löses. Användningen av salixflis är dock för närvarande maximerad till 15 %. En planerad odling av Salix nära kraftvärmeverket skulle kunna

medföra att det genomsnittliga transportavståndet för Salix inte ökar även om mängderna ökar. Tabell 41 beskriver de relativa förändringarna i miljöbelastning om all Grot byts ut mot Salix-flis. Det antas att värmevärdet per ton TS är lika för de båda produkterna.

Tabell 41. Relativa förändringar i miljöbelastningen om all Grot byts ut mot Salix-flis.

	Total
Bränsle	0,95
CO ₂	1,54
SO ₂	5,06
CO	1,12
NOx	1,08
HC	1,03
Energi	1,55

7.7. Effekter av reducerad användning av biprodukter

En ökad satsning på bibränslebaserad kraftproduktion kan medföra att den mängd restprodukter från t.ex. sågverk som är tillgänglig för det studerade kraftvärmeverket reduceras. Tabell 42 visar effekterna av att 50 % av alla restprodukter som för närvarande används byts ut mot Grot som hanteras direkt utan terminalhantering. Det har här antagits att de genomsnittliga transportavstånden för Groten inte ökar resp. ökar från 65 till 85 km.

Tabell 42. Relativa förändringar i miljöbelastningen om 50% av biprodukterna byts ut mot en ökad mängd Grot.

	Total vid 65 km avst.	Total vid 85 km avst.
Bränsle	1,196	1,299
CO ₂	1,176	1,269
SO ₂	1,108	1,110
CO	1,294	1,341
NOx	1,221	1,307
HC	1,266	1,331
Energi	1,176	1,268

8. Diskussion

8.1. Metodik och indata

Resultaten är beräknade för ett specifikt värmeverk och det är därför inte säkert att dessa är representativa för alla anläggningar av denna typ. Logistiksystemen för varje material är sannolikt uppbyggda på liknande sätt för huvuddelen av anläggningarna medan sammansättningen av bränslmixen varierar liksom de genomsnittliga transportavstånden. Transportavstånden är dessutom beroende av anläggningens storlek, eftersom en stor anläggning kräver ett större uppsamlingsområde för råvarorna.

I studien har den bakre systemgränsen för de biprodukter som är involverade (sågspån, råflis etc.) placerats efter det att den primära produkten (exv. sågat timmer) utvunnits, och miljöbelastningen från tidigare steg har inte belastat energiproduktionen. Denna metodik är rimlig så länge som det inte finns någon alternativ användning för biprodukterna. En viss efterfrågan finns dock i vissa fall för dessa produkter, exv. från skivtillverkare, vilket skulle tala för att systemgränserna skulle behöva vidjas för att inkludera även odlingen, skötseln och avverkningen av skogen. En allokering av miljöbelastningen efter ekonomiskt värde mellan det sågade timret och sågspånet skulle dock sannolikt resultera i en mycket liten belastning för biprodukten.

Om inte de nämnda biprodukterna transporteras till förbränningsanläggningen måste de tas om hand på något annat sätt. Om ingen nyttig användning existerar måste de oftast transporteras till soptipp. En sådan transport skulle också ha orsakat en miljöbelastning, en miljöbelastning som kunde antas reducera den belastning som allokeras till energiframställningen. Biprodukternas del av den totala miljöbelastningen från energiproduktionen är dock relativt liten varför effekten på den totala siffran för hela anläggningen skulle vara begränsad. Transporterna av aska från värmeverket har försumrats i beräkningarna eftersom de transporterade mängderna är små jämfört med mängderna av icke förbränd råvara.

Resultaten är starkt beroende av de emissionsdata som definieras för arbetsmaskiner och lastbilar. Emissionsfaktorer för arbetsmaskiner mäts enligt de standardiserade testcyklerna ECE R49 eller ISO 8178. Emissionsvärden mäts vid 8 eller 13 olika belastningspunkter (moder) och resultaten vägs samman till ett genomsnittsvärde. Vägningsfaktorerna är inte anpassade till de speciella arbetsförhållanden som gäller för respektive maskin, och studier på lantbrukstraktorer har visat att detta kan medföra stora fel i resultaten (Hansson et al, 1998). En del av maskinerna exv. lastmaskinerna utsätts också för snabba transienta förändringar i motorns belastning. De standardiserade testcyklerna är baserade på mätningar under statiska förhållanden och de dynamiska effekterna inkluderas inte, varför testvärdena sannolikt understiger de verkliga emissionsnivåerna för dessa maskiner.

8.2. Val av tillförselsystem

Resultaten visar att användningen av biprodukter som exv. sågspån och torrflis är mycket fördelaktig när det gäller att begränsa tillförselsystemets miljöbelastning. Detta var ett väntat resultat eftersom dessa produkter bara antas belastas av miljöbelastningen som orsakas av transporten till förbränningsanläggningen. Den Grot som fraktas till anläggningen måste först samlas upp och sedan sönderdelas, operationer som ökar systemets miljöbelastning till ca 5-8 gånger den för biprodukterna.

Analysen av hur miljöbelastningen från Grot-hantering fördelar sig över de olika operationerna visar att skotningen, flisningen och transporten till värmeverket alla medverkar till en betydande del av belastningen, medan effekterna av lastningsoperationerna är mera begränsade. Grot-hantering över terminal innebär extra transport- och lastningsmoment som ökar miljöbelastningen med ca 30 % jämfört med direkt transport till värmeverket. Vidare ger flisning på hygget något större belastning än flisning vid avlägget men skillnaderna är ganska små.

Biprodukterna är ur miljösynpunkt positiva att använda, men tillgången till dessa styrs i huvudsak av mängden sågverk i närheten och är svår att påverka. En ökad användning av bibränslen för el- och värmeproduktion kan dessutom leda till att konkurrensen om biprodukterna ökar och de tillgängliga mängderna minskar räknat per förbränningsanläggning. En ökad framställning av andra varor av biprodukterna, exv. spånskivor, kommer även den att minska tillgången för värmeverken. Resultaten visar att om 50 % av alla biprodukter måste bytas ut mot Grot så ökar den totala dieselförbrukningen med 20 %, om man antar att medelavstånden för Grot-transporterna inte ökar, och med 30 % om man antar att avstånden ökar med 20 km. En ökning av transportavstånden är rimlig om den uttagna mängden ökar varför det senare alternativet bedöms som rimligast.

Transportavstånden har enligt Kapitel 7.3 ganska stora effekter på systemets miljöpåverkan. Detta är tydligast för biprodukterna eftersom en stor del av effekterna av dessa produkter är kopplad till transporterna.

Resultaten visar att dieselförbrukningen för att tillföra ett ton TS till värmeverket i form av Salix är lägre än för motsvarande mängd Grot. När det gäller energianvändningen och för övervägande delen av emissionerna är dock resultaten de omvända. Detta förklaras av att produktionen av konstgödseln till Salix-odlingen kräver stora insatser av framförallt elektrisk energi. Ett sätt att drastiskt reducera energianvändningen för de nödvändiga näringsämnen är att använda organiska avfallsprodukter som gödselmedel. Denna användning har ett flertal positiva effekter och studeras för närvarande både i teoretiska analyser och fullskaleförsök.

Användningen av traktorsläp för transportarbetet visar sig enligt resultaten i Kapitel 7.5 öka dieselförbrukningen för transporterna av Salix med ca 2 % medan NOx-emissionerna istället reduceras något. Räknat för hela Salix-kedjan blir de relativa förändringarna bara några få procent varför de två transportsätten närmast kan ses som likvärdiga med hänsyn till de studerade miljöparametrarna. Sannolikt finns det ett antal transportuppgifter inom det studerade systemet för vilka traktortransporter skulle vara att föredra framför lastbiltransporter, även ur ekonomisk synvinkel. Transport av Salix-flis skördad på den egna gården under vintern när arbets- och transportkapacitet finns ledig, och avståndet till värmeverket inte är för stort, borde vara en sådan, men studiens omfattning har inte medgivet några ekonomiska analyser. En påverkande faktor för just den studerade anläggningen är att den är belägen så att en stor mängd traktortransporter till denna knappast är önskvärd ur trafiksynpunkt. Möjligheterna att utnyttja traktortransporter kan alltså begränsas även av trafikmässiga hänsyn.

8.3. Emissioner från förbränningen

Emissionerna från logistiksystemet kan relateras till de emissioner som produceras vid förbränningen av bränslena i kraftvärmeverket. Antar man översiktligt ett värmevärde på 19,2 MJ/kg TS för samtliga bränslen som används och utnyttjar de materialmängder som redovisas i Kapitel 5, samt genomsnittssiffror för skorstensemissioner vid förbränning av bibränsle för

el- och värmeproduktion som redovisats av Vattenfall (1996), får man resultaten som redovisas i Tabell 43. Det bör uppmärksammas att de redovisade skorstensvärdena är avsiktligt överslagsmässigt beräknade och inte anpassade speciellt till den anläggning som logistikdatan är hämtad ifrån.

Tabell 43. Emissionsmängder vid förbränning av bibränslena jämfört med mängder alstrade av råvaruförsörjnings-systemet

Emission	Förbränning	Råvaruförsörjning
CO ₂ , ton	(110 000)	891
SO ₂ , kg	10 200	381
CO, kg	55 100	2101
NO _x , kg	60 600	11 355
HC, kg	små mängder	834

Mängderna CO₂ från försörjningssystemet är små jämfört med mängderna som alstras vid förbränningen, men eftersom den CO₂ som frigörs vid förbränningen tidigare har lagrats upp i biomassan, så är det försörjningssystemet som alstrar den övervägande nettodelen av CO₂-emissionerna vid produktion av biobaserad el och värme.

Mängderna av CO och SO₂ som alstras av systemet för råvaruförsörjning är mindre än 5 % av de mängder som släpps ut vid förbränningen medan NO_x-emissionerna från dagens försörjningssystem uppgår till ca 20 % av mängderna som kommer genom anläggningens skorsten, vilket är en betydande del av denna mycket skadliga emission. Vid förbränningen i kraftvärmeverket är utsläppen av kolväten (HC) mycket låga medan förbränningen av de fossilbaserade bränslena i fordonsmotorerna enligt beräkningarna producerar ca 800 kg oförbrända kolväten.

8.4. Effekter av strängare avgaskrav

Resultaten redovisade i kapitel 7.2 visar att de strängare emissionskrav som kommer att gälla framöver sannolikt har viktigast effekt på NO_x-emissionerna, vilka kan komma att minska med ca 68 % enligt Scenario 3 och ända upp till 71 % enligt Scenario 4. Dessutom kan HC-utsläppen komma att reduceras med ca 35 %. Kan den 10 procentiga reduktionen av bränsleåtgången per ton TS uppfyllas, vilket antas i Scenario 4, kommer även CO₂-emissionerna att reduceras. Denna ökade bränsle-effektivitet är rimlig med tanke på utvecklingen 10 år bakåt i tiden, men kan trots detta bli svår att uppnå. Orsaken är de kommande strängare begränsningarna för NO_x-emissioner och att det är svårt att konstruera en motor med både god bränsleeffektivitet och låga NO_x-värden. Dessutom kan det bli nödvändigt att montera katalysatorer även på dieselmotorerna för att klara emissionskraven, något som normalt ökar bränsleåtgången med 5-10 %.

Steg 2 begränsningarna för emissionerna från off-road maskiner kommer att gälla från 2003 och Euro 5 begränsningarna för lastbilar från 2008. Eftersom fordonen som används i de

studerade systemen har långa årliga användningstider är en större del av dem mindre än 5 år gamla. Ett rimligt tids-perspektiv för Scenario 3 och 4 är därför ca år 2010-2012.

En minskning av mängden CO₂-emissioner per ton TS kan enligt diskussionen ovan bli svår att uppnå utan genomgripande förändringar i systemet, sådana förändringar skulle kunna vara en storskalig övergång till biobaserade bränslen som exv. RME, eller användning av ny motorteknik baserad på exv. bränsleceller. Ingen av dessa förändringar bedöms dock ha möjlighet att slå igenom storskaligt före år 2010.

8.5. Områden med behov av framtida studier

Studier av den genomförda typen ger ofta upphov till en mängd nya funderingar och frågor, och så har varit fallet även för detta arbete. Nedan följer en beskrivning av några viktiga områden där behovet av framtida forskningsinsatser bedöms vara speciellt stort.

Ett problem vid analyser av hur alternativa bränslesammansättningar påverkar den totala miljöbelastningen är att bestämma sambandet mellan uttagen mängd och genomsnittligt transportavstånd. En ökad efterfrågan kan medföra högre betalningsförmåga och tidigare icke tillgängliga men näraliggande råvarukällor kan bli tillgängliga. För energigrödor som Salix är det dessutom möjligt att planera placeringen av odlingarna så att de kommer nära värmeverken. Metodik baserad på tillämpning av linjär programmering (LP) skulle sannolikt kunna utnyttjas för att studera samband mellan råvaruuttag och transportavstånd, men ett sådant arbete har inte rymts under detta projekt.

Beräkningarna är beroende av bra emissionsdata för att resultaten skall bli tillförlitliga. Enligt diskussionen ovan saknas data för hur dynamiska och transienta belastningar påverkar emissionsmängden från arbetsmaskiner. Forskningsprojekt är dock påbörjade för att ta fram sådana data för både lantbrukstraktorer och skogsmaskiner. Sådan forskning ger också ett underlag för att en minskning av de transienta effekterna skall kunna uppnås.

Det bör även tilläggas att studien fokuserat på de studerade systemens miljöbelastning medan deras ekonomiska egenskaper inte har berörts. Möjligheten att i framtida studier kombinera ekonomiska och miljörelaterade resultatmått skulle vara mycket värdefull.

9. Referenser

Air Drag Coefficients. 1998. <http://sural.jlab.org/~gripp0/airdragchart.html>

Andersson T. 1999. Valtra Traktor AB, personligt meddelande.

Brunberg B., Andersson G., Nordén B. & Thor M. 1998. Forest bioenergy fuel –final report. (in Swedish – English summary) SkogForsk (The forestry research institute of Sweden) Report 6.

Brunberg B., Frohm S., Nordén B., Persson J. & Wigren C. 1994. Forest-fuel technology project: Final report. (in Swedish – English summary) SkogForsk (The forestry research institute of Sweden) Report 5.

- Börjesson, P. & Gustavsson, L. 1996. Regional production and utilization of biomass in Sweden. *Energy* 21:9, sid 747-764.
- Cornetti G. M., Klein K. Fränkle G. J. and Stein H. J. 1988. US Transient Cycle Versus ECE R.49 13-Mode Cycle, Society of Automotive Engineers, 880715.
- Cundiff, J.S., Dias, N, Seralie, H. D. 1997. A linear programming approach for designing a herbaceous biomass delivery system. *Bioresource Technology*, 59, sid 47-55.
- Eriksson, O. 1992. Råvarubalans och logistik för ett kraftvärmeverk i Skövde. Vattenfall Rapport U(B) 1992/11.
- Hansson P-A. Burström A. Norén O. Bohm M. 1998. Bestämning av motoremissioner från arbetsmaskiner inom jord- och skogsbruk. Rapport 232, Institutionen för lantbruksteknik. Uppsala.
- Hansson, P-A. Norén O & Bohm , M. 1999 . Effects of specific work operation weighting factors on the results from standardized measurements of tractor engine emissions. *Journal of Agricultural Engineering Research*. pp 347-353.
- Hedberg G. 1999. Naturbränsle AB, Enköping, personligt meddelande.
- Jacobson B. 1999. Institutionen för maskin- och fordonskonstruktion, Chalmers tekniska högskola, personligt meddelande.
- Kristensson N., och Axenbom Å. 1991. Traktor eller lastbil vid transport av biobränslen?. *Institutionsmeddelande* 91:04, Institutionen för lantbruksteknik.
- Landbrugets Maskinöversigt 1998. 1998. Landbrugets Rådgivningscenter, Århus, Danmark
- McCormack R. J. 1990. Measuring and Evaluating Log Truck Performance in a Variety of Operating Conditions. Virginia Tech, Department of Forestry, Blacksburg, Virginia, USA
- ngm. 1997. Energi- och emissionsuppgifter för godstransporter i Sverige. ngm – nätverket för godstransporter och miljön, Göteborg.
- ntm. 2000. Nätverket för transport och miljö, Databas som uppdateras kontinuerligt och inte publiceras i rapportform (www.ntm.a.se)
- Sigfridsson, K & Stenström, B. 1989. Kartläggning av förorenande utsläpp från traktorer, arbetsmaskiner m.m. Swedish environmental protection agency, project 124-560-89.
- Sonesson, U. 1993. Energianalyser av biobränsle från höstvet, raps och salix. Department of Agricultural Engineering, Swedish University of Agricultural Science, Report 174.
- Staland, P. och Westerberg, D. 1991. Transportsystem för biobränslen. Vattenfall Rapport U(B) 1991/53.
- Vattenfall. 1996. Livscykelanalys för Vattenfalls elproduktion (LCA of the electricity production of Vattenfall). Report Vattenfall.
- Zackrisson R. 1999. Volvo Lastvagnar Serviceavdelningen, personligt meddelande.