

Timmerbil utrustad för minskat luftmotstånd och lägre bränsleförbrukning

Aero kitted timber truck for reduced fuel consumption

Henrik von Hofsten
Daniel Noreland



Timmerbil utrustad för minskat luftmotstånd. Foto: Henrik von Hofsten

Innehåll

Förord	3
Summary	4
Sammanfattning	5
Inledning	5
Bakgrund	6
Ett prototypfordon	7
Erfarenheter från praktiken	8
Intervju med föraren	9
Detaljerad experimentell undersökning av aerodynamiska åtgärder	10
Teori	10
Försökupställning	11
Uppmätta signaler	12
Höjdvärden	12
Försöket	13
Resultat	14
Osäkerheter	15
Modellstabilitet	16
Modellrobusthet	16
Diskussion	17
Potential för bränslebesparing – en simulering	18
Slutsatser	20
Referenser	21
Bilaga 1	22



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

Kvalitetsgranskning (Intern peer review) har genomförts 25 januari 2022 av Gert Andersson, Programchef. Därefter har Magnus Thor, Forskningschef, granskat och godkänt publikationen för publicering den 9 februari 2022.

Redaktör: Anna Franck, anna@annafranck.se
©Skogforsk 2021 ISSN 1404-305X

Förord

Den här rapporten beskriver Skogforsks bidrag till projektet ETT-aero2, som inleddes 2016. Trots många hinder på vägen och därmed följande förseningar har projektet slutligen gått i mål, och vi som arbetat med projektet är mer än nöjda med slutresultatet, vars värde ligger såväl i "leverablerna" som de erfarenheter vi samlat på vägen mot målet.

Vi vill rikta vårt varma tack till alla dem som bidragit med kunskap och utrustning i olika skeden av projektet. Speciellt viktiga insatser har här gjorts av Linköpings universitet i egenskap av projektledare, Fröjds åkeri i Kisa AB samt Landberg Solutions AB. Slutligen vill vi tacka Energimyndigheten som genom VINNOVA och FFI finansierat projektet.

Uppsala i januari 2022

Daniel Noreland

Summary

Air drag accounts for a considerable proportion of energy losses for a timber truck. Two methods for drag reduction have been tested experimentally: pulling the stakes together by means of a novel system for bunk displacement, and aerodynamic skirts. Together, the measures can reduce fuel consumption by 1-2 percent on average, corresponding to 700-1400 litres of fuel annually for an average timber truck in Sweden.

A coastdown test was used to measure the effect of the measures. By pulling the stakes together when driving unloaded, drag (C_d times frontal area) is reduced by 0.5 m^2 (from a normal figure of around 8 m^2). Aerodynamic skirts covering the gaps between the wheels of the trailer further reduce drag by 0.2 m^2 . Considering the weight of the skirts and observed speed profiles, the measures are estimated to reduce fuel consumption by 1.1 litres of diesel per 100 km when driving unloaded, and by 0.3 l/100 km when loaded. Taking into account the reduced load due to the weight of the skirts, and assuming 50 percent empty running, the measures have potential for an average equivalent reduction of 0.6 l/100 km.

Under practical conditions, the skirts have proved to work well without hampering loading or vehicle handling. Fuel statistics from 15 runs with a skirted trailer and 15 runs with a reference trailer show too much variation to accurately quantify the difference, but there is a statistically significant difference in favour of the skirted trailer.

Sammanfattning

Luftmotståndet står för en betydande del av energiförlusterna hos ett timmertransportfordon. Två metoder för att minska luftmotståndet har undersökts experimentellt: sammandragna stakar med ett nytt tekniskt system för bankförskjutning samt vindavvisande kjolar. Tillsammans kan åtgärderna minska bränsleförbrukningen med 1–2 procent i genomsnitt, motsvarande 700–1400 liter drivmedel per år för ett genomsnittligt timmerfordon i Sverige.

Ett utrullningsförsök har utförts för att mäta åtgärdernas effekt. Genom att dra samman stakarna på släpet vid tomkörning minskar luftmotståndet (produkten av luftmotståndskoefficient och frontarea) med $0,5 \text{ m}^2$ från normalt runt 8 m^2 . Aerodynamiska kjolar, som täcker utrymmena mellan släpets hjul, minskar luftmotståndet med ytterligare $0,2 \text{ m}^2$. Med hänsyn till tillkommande vikt för kjolpaketet och utifrån observerade hastighetsprofiler beräknas åtgärderna minska drivmedelsförbrukningen med 1,1 liter diesel per 100 km vid tomkörning och med 0,3 l/100 km vid lastkörning. Utifrån reduktionen i lastvikt som kjolorna innebär uppskattas åtgärdernas sammanlagda besparingspotential till motsvarande 0,6 liter diesel per 100 km vid 50 procents lastkörningsgrad.

I praktisk drift har kjolpaketet fungerat väl utan att påverka vare sig lastning eller framkomlighet negativt. Förbrukningsstatistik från 15 körningar med ett kjolförsett släp, och 15 körningar med ett referenssläp utan kjolar, har för stor varians för att kvantifiera skillnaden med någon större noggrannhet, men visar en signifikant skillnad till det kjolförsedda ekipagets fördel.

Inledning

Minskade utsläpp från skogsbrukets transporter har länge varit ett fokusområde för Skogsforsks FoI-arbete. Detta har framför allt lösts genom att påvisa att med mer last per transport kan bränsleförbrukningen för ett givet transportarbete minskas med 10–15 procent utan att påverkan på vägen nödvändigtvis behöver bli större. I slutet av 2015 adresserades aerodynamiken på allvar i syfte att ytterligare minska bränsleförbrukning och emissioner, i ett samarbete med Linköpings universitet (LiU). LiU har, via avancerade simuleringsstudier, kunnat identifiera åtgärder som kan vidtas för minskat luftmotstånd på virkesfordon. Uppgiften är mycket komplex, eftersom en lastad respektive olastad timmerbil utgör helt olika fordon, ur aerodynamisk synvinkel.

Potentialen för minskad bränsleförbrukning med förbättrad aerodynamik för timmerfordon har beräknats till 4–6 procent, motsvarande upp till 20 000 ton CO₂ per år för skogsbrukets transporter (Löfroth & Gelin 2015).

Bakgrund

Redan i början av 2000-talet diskuterades frågan om skogsbrukets transporter och dess bidrag till koldioxidutsläppen livligt. En lösning blev att utveckla fordon som kunde ta mer last och därmed sänka såväl bränsleförbrukningen som koldioxidutsläppen per mängd utfört transportarbete. Efter ett antal turer och diskussioner med tillverkare, myndigheter och forskning stod det första ETT-fordonet på hjulen i januari 2009. Förkortningen ETT står för En Trave Till, eftersom fordonet lastade fyra travar i stället för de normala tre. Fordonet blev då ca 30 meter långt, med en lastvikt om ca 63 ton och en bruttovikt på maximalt 90 ton. Parallellt med ETT-fordonet startades även försök med så kallade ST-fordon där ST står för Större Travar. Dessa höll sig inom den reglerade fordonslängden om 25,25 meter, men genom att lasta något högre kunde de nå 74 tons bruttovikt eller ca 54 tons lastvikt. (Svensson & Löfroth 2012, Asmoarp m.fl., 2018).

Den i dessa projekt förväntade bränslebesparingen kunde uppfyllas med god marginal. ETT-bilen drog 15–20 procent mindre bränsle per transporterad godsmängd och ST-bilarna 8–12 procent mindre än dåtidens normala 60-tonsfordon. Projekten följdes snart av andra liknande projekt både inom och utanför skogsbruket. Alla har visat på liknande bränslebesparingar även om nivåerna varierar beroende av geografi, godsslag och fordonstyp.

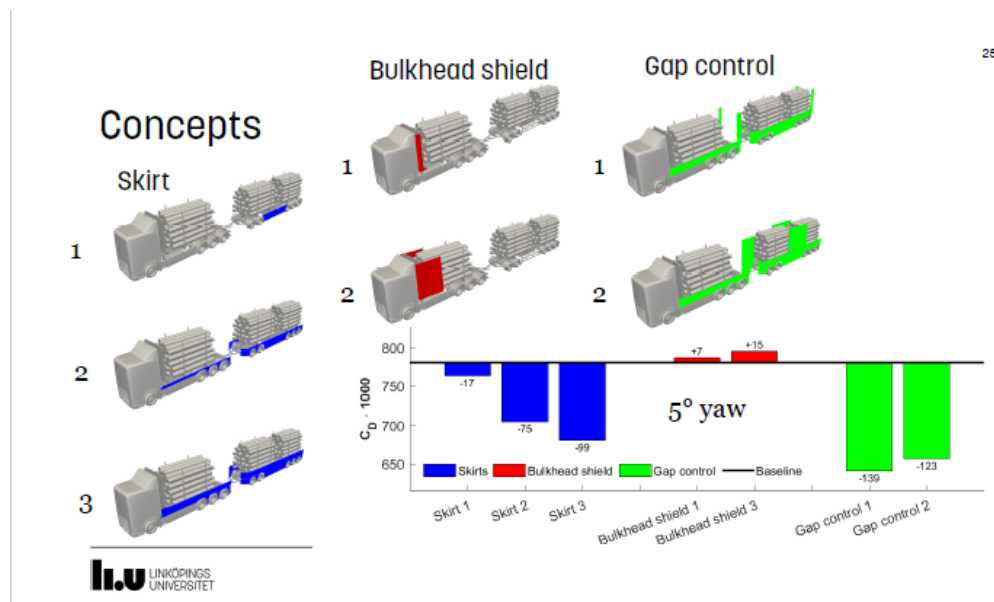
Det finns fortsatt stora möjligheter att minska bränsleförbrukningen som inte närmare studerats. Att genom tekniska lösningar minska bränsleförbrukningen på skogsfordon har stor potential, där luft- och rullmotstånd är de två viktigaste faktorerna. Lastbilstillverkarna lägger ner mycket arbete på att minska luftmotståndet med bättre design av hytt och chassi på lastbilen. Delar av det arbetet kan vara mer eller mindre bortkastat om inte lastbilens påbyggnad liksom efterfordonen (släpvagn, dolly, link och trailer) också är aerodynamiskt utformade. Det är viktigt att komma ihåg att det största luftmotståndet inte skapas framför ett fordon utan bakom. Jämför engelskans ”aerodynamic drag”, vars ungefärliga betydelse på svenska är aerodynamiskt sug. Bakom ett fordon i rörelse skapas kraftig turbulens som i sin tur skapar ett undertryck som närmast suger fordonet bakåt.

Utförda vindtunnelstudier inom projektet ETT-aero (Energimyndigheten 38482–1) visade på goda möjligheter att minska luftmotståndet till exempel genom att minska mellanrummet mellan bil och släp, genom anpassade vindavvisare och genom koniskt avslut på vagnen. (Karlsson m.fl. 2015, Löfroth & Gelin 2015).

Som en direkt fortsättning på ETT-aero, initierades förevarande projekt – ETT-aero2 (VINNOVA Dnr. 40281–1). Syftet med projektet är att utveckla, undersöka samt verifiera aerodynamisk utformning av timmer- och flisbilar som är tyngre och längre än dagens fordon. Framstegen inom ETT-aero2 har lett till avsevärt förfinade simuleringsmodeller som bidrar med underlag för de aerodynamiska påbyggnader som redovisas i denna delrapport till huvudprojektet.

Förutom att styrka vindtunnelresultaten visar simuleringsstudierna att de största aerodynamiska problemen för den lastade timmerbilen är den luft som passerar under släpfordonen samt det gap som bildas mellan första och andra traven (mellan bil och släp) men även vid den tvära avslutningen av ekipaget (Figur 1). Vad gäller olastade timmerbilar är det dels turbulensen under släpfordonen som skapar luftmotstånd, dels stakar och bankar som står upprätt i fartvinden. Om dessa fälls eller dras ihop skulle luftmotståndet minskas avsevärt. CFD-simuleringarna (Computational Fluid Dynamics)

tyder på ett minskat luftmotstånd på runt tio procent per åtgärd, där bränslebesparingen kan uppskattas till cirka $\frac{1}{3}$ av den uppnådda minskningen i luftmotstånd, beroende på genomsnittlig fordonshastighet.



Figur 1. Exempel på resultat från simuleringarna. Längst till vänster olika former av kjolar (skirts) där resultaten i form av minskat luftmotstånd framgår av de tre blå staplarna. Att täcka mellan hytt och första traven (bulkhead shield) framstår som mindre lyckat och ökar snarare luftmotståndet något (röda staplar). Kjolar i samverkan med vindavvisare mellan bil och släp samt i bakkant på släpet (gap control) framstår som mest effektivt, men också svårast att implementera praktiskt. (Källa LiU).

Ett prototypfordon

Från de olika koncepten som undersöktes av LiU valdes en konfiguration ut för praktisk provning. Valet gjordes med hänsyn till effekt, produktionskostnad och praktisk användbarhet, och kom att stanna vid den variant där utrymmen mellan släpets hjul täcks av aerodynamiska kjolar (Figur 3 och Figur 4). Släpet försågs även med vindavvisare placerade framför första axeln. Kjolorna tillverkades av plastark och monterades på aluminiumprofiler av det slag som även används för underkörningsskydd.

Av olika skäl var det inte möjligt att anpassa bilen på samma sätt, men den var redan från början försedd med aluminiumsidor som täcker mycket av utrymmet mellan första och andra axeln.

Ytterligare en fördel med så kallade kjolar som hindrar luft att komma in under släpfordonen och där skapa turbulens, kan vara att åtgärden minskar risken för att snö som dras in av turbulensen lägger sig på axlar och fjädringsbälgar under släpfordonen. Det förekommer att sådan snö bildar fastfrusna drivor på upp till ett par ton innebärande att en från början korrekt lastad fordonkombination är överlastad vid ankomst till industri.

I detta försök har, utöver de aerodynamiskt anpassade kjolarna, även studier gjorts av effekten av att dra ihop stakar och bankar i en punkt på vagnen. Företaget Landberg Solutions AB håller på att utveckla ett system (HILA) för att kunna flytta bankarna längs vagnens längsgående balkar med hjälp av ett system där små hydraulcylindrar vandrar längs en fast monterad kolvstång. Eftersom cylindrarna är öppna i båda ändar kan slaglängden i princip bli oändlig. Det hela styrs digitalt av en särskild dator, som också kan positionera om bankarna beroende av vilka virkeslängder som ska lastas. Se även www.flexrow.com/applications/timber/. I denna studie har tester enbart gjorts för helt sammandragna respektive särdragna bankar för fallande virkeslängder.

Erfarenheter från praktiken

Syftet med aerodynamisk anpassning är att minska energianvändningen. Det yttersta beviset på förbättringarnas faktiska effekt under verkliga förhållanden är via en långtidsuppföljning av drivmedelsanvändningen. Av erfarenhet vet vi dock att det är mycket svårt att belägga skillnader i bränsleförbrukning empiriskt i praktisk drift när skillnaderna är så små som i detta fall. De förväntade effekterna (en besparing på runt en liter per 100 km) är avsevärt mindre än den säsongsvariation man kan förvänta sig att se för ett och samma fordon över året. Variationen beror på föränderliga faktorer såsom däckstyp och slitagegrad, omgivande temperatur, väglag, fordonets skick med flera tekniska faktorer samt inte minst förar beteendet. För att statistisk utjämna dessa effekter krävs ett dataunderlag av en storlek som, för att säkerställa statistisk signifikans, ligger utanför innevarande projekts budget och tidsramar.

Bränsleuppföljningsdata har ändå samlats in för 30 lass virke transporterade i skytteltrafik från Kisa till Mönsterås bruk. Hälften av transportererna skedde med det "aero-kittade" släpet, det vill säga ett släp utrustat för lägre luftmotstånd, och hälften med referensfordon – två likadana vagnar, byggda samtidigt och efter samma ritning som försöksobjektet, men utan aero-kit och i stället med vanliga underkörningsskydd monterade. Förutom kjolpaketet var den enda formella skillnaden mellan släpen att referensfordonen hade sex bankar (och därmed tolv stakar), till skillnad från det modifierade försöksobjektets fyra bankar och åtta stakar. Därav följer att referensfordonet väger knappt 350 kg mer än det modifierade. De första 14 körningarna utfördes med en Scania R480 (2012, EURO V), och de resterande med en Scania R450 (2020, EURO VI).

Den jämförande studien hade två syften. Det ena var att mäta bränslebesparingen under verklig drift. (I detta ingick inte bara att bestämma den nominella besparingen, utan även eventuella skillnader i transportprestation, men driftsperioden var för kort för att kvantifiera detta.) Det andra var att samla in praktiska erfarenheter kring kjolpaketets funktion under fältmässiga förhållanden.

Även om två fordon i princip är lika måste man utgå ifrån att de kommer att bete sig något olika. Däckens fabrikat och förslitningsgrad kan påverka rullmotståndet olika, liksom de små skillnader i hjulinställningar som kan förväntas efter flera års drift. Resultaten från en fokusstudie som denna måste därför tolkas med försiktighet, trots de variansminimerande åtgärderna att använda (väsentligen) samma rutt och samma förare för både försöks- och referensfordonen.

Bränsleförbrukningen har mätts genom nollställning av trippmätaren för varje delsträcka, varvid även bränsleförbrukningsmätaren nollställs (se Bilaga 1 för grunddata). Efter varje delsträcka (tom respektive lastad) har total bränsleförbrukning, körd sträcka samt vikten noterats. Den senare kommer från vågen vid inmätningen på Mönsterås bruk. Resultaten av bränsleuppföljningen framgår av Tabell 1. Eftersom de två bilarna sinsemellan är tekniskt olika presenteras resultat för var och en av dem. Det bör noteras att de observerade förbrukningarna genomgående är mycket låga jämfört med andra liknande studier. Ingen nivåläggning av fordonens interna bränsleflödesmätning har gjorts, men erfarenheter från andra projekt visar att noggrannheten typiskt ligger runt tre procent.

Tabell 1. Bränsleförbrukning beroende av vilket släp som varit tillkopplat uttryckt dels som ml/tonkm, dels som liter/100 km.

	Medelvikt, lastad	l/100 km tom	l/100 km last	l/100 km tot	ml/tonkm
Aero, R480	65,8	27,9	54,2	41,2	16,6
Referens, R480	65,7	29,9	54,0	41,9	17,4
Aero, R450	69,8	27,2	50,2	38,8	14,9
Referens, R450	69,4	28,6	50,2	39,5	15,4
Differens, R480	+0,1	-2,0 ~ -6,7%	0,2 ~ +0,4%	-0,7 ~ -1,7%	-0,8 ~ -4,6%
Differens, R450	+0,4	-1,4 ~ -4,9%	0,0 ~ 0,0%	-0,7 ~ -1,8%	-0,5 ~ -3,2%

Skillnaden i förbrukning mellan aero-kittat och referensekipage vid tomkörning är vid 95 procent konfidensintervall $-2,0 \pm 1,7$ l/100 km samt $-1,4 \pm 1,2$ l/100 för de två bilarna. Vid lastkörning är motsvarande värden $0,2 \pm 3,6$ l/100 km samt $0,0 \pm 1,8$ l/100 km. Genomsnittsvikten är 345 kg högre för referensekipaget vid tomkörning. Skillnaden i vikt ansvarar till storleken för ungefär 0,18 l/100 km (se beräkningar nedan). Det lilla antalet observationer i kombination med potentiellt stort inflytande av varierande faktorer såsom vind eller vägval gör det vanskligt att kvantifiera effekterna av aero-kittningen utifrån bränsleuppföljningen. Kvalitativt kan man dock på 95 procentnivån slå fast att det vid tomkörning föreligger en skillnad till det modifierade ekipagets fördel. Hur stor del av skillnaden som beror på referensvagnens extra stakar och bankar och hur stor del som kan tillskrivas aero-kittet på den andra vagnen kan inte uppskattas genom upplägget av denna studie.

Intervju med föraren

Fordonets förare berättade under en intervju att han blivit positivt överraskad av hur väl släpet fungerat framkomlighetsmässigt. Detta även under de bitvis ganska svåra förhållanden som råder i Götalands enskilda vägnät med smala vägar, tvära kurvor och begränsat utrymme bredvid vägen. Även lastning och lossning uppges ha fungerat klanderfritt utan att störa kranförarna. En farhåga som uttrycktes från flera åkare tidigt i försöket var att kjolarna skulle fungera som fästytor för snö- och ispåslag. Enligt försökets förare var förhållandet snarare det omvända, med mindre påslag på skärmar och i hjulhus än för referensfordonet. Aerodynamiskt är en sådan förbättring egentligen inte förvånande eftersom turbulens, som ju kjolarna är tänkta att reducera, är en vanlig orsak till att snö och smuts fastnar på utsatta ytor.

Detaljerad experimentell undersökning av aerodynamiska åtgärder

Med tanke på den korta tiden för empirisk datainsamling genomfördes i stället ett så kallat utrullningsexperiment för att direkt kvantifiera olika åtgärders reduktion av luftmotståndet. Utrullningsprov är en standardmetod för att mäta rull- och luftmotstånd experimentellt (FN/ECE/2015/1038). Experimentet går till så att fordonet accelereras till en hög fart (80–85 km/h) varefter växellådans friläge läggs i. Sedan registreras hur fordonet saktar in under inverkan av luft- och rullmotstånd samt vägens lutning. Övriga bromsande krafter antas vara försumbara. Utifrån den registrerade fartprofilen och höjddata för vägen kan både rull- och luftmotstånd beräknas.

Teori

Följande beteckningar används i framställningen som följer:

Tabell 2. Använda symboler och beteckningar. * betecknar varierande storheter.

Symbol	Storhet	Enhet	Värde
C_r	Rullmotståndskoefficient	-	
C_d	Luftmotståndskoefficient	-	
A	Frontarea	m ²	10,4
m	Fordonets massa		17 935*
m_{rot}	Roterande massa	kg	1314
$m_{\text{eff}} = m + m_{\text{rot}}$	Effektiv massa	kg	*
v	Fart	ms ⁻¹	*
v_{vind}	Medelvindstyrka	ms ⁻¹	*
ρ	Luftens densitet	kgm ⁻³	*
g	Jordaccelerationen	ms ⁻²	9,82
z	Höjdvärde	m	*
t	Tid	s	*

Den roterande massan m_{rot} motsvarar den ekvivalensmassa som framför allt hjulens tröghetsmoment bidrar med.

En regressionsmodell för att bestämma C_r och produkten $C_d A$ kan formuleras utifrån en energibetraktelse av utrullningsförloppet. Under ett tidsintervall Δt tillryggalägger fordonet en sträcka Δx . Den energi som därvid omsätts genom friktion via rull- och luftmotstånd motsvaras av en ändring i fordonets kinetiska och potentiella energi:

$$\int_x^{x+\Delta x} \left(mgC_r + \frac{1}{2} C_d A \rho v(x)^2 \right) dx = -\frac{1}{2} m_{\text{eff}} (v(x+\Delta x)^2 - v(x)^2) - mg(z(x+\Delta x) - z(x))$$

Positionen är en funktion $x(t)$ av tiden, varför vänsterledet kan skrivas

$$\int_x^{x+\Delta x} \left(mgC_r + \frac{1}{2} C_d A \rho v(x)^2 \right) dx = \int_t^{t+\Delta t} \left(mgC_r + \frac{1}{2} C_d A \rho v(x(t))^2 \right) v(x(t)) dt$$

Enligt integralkalkylens medelvärdessats gäller att

$$\int_t^{t+\Delta t} \left(mgC_r + \frac{1}{2} C_d A \rho v(x(t))^2 \right) v(x(t)) dt = \left(mgC_r v(\xi) + \frac{1}{2} C_d A \rho v(\xi)^3 \right) \Delta t, \xi \in [t, t + \Delta t].$$

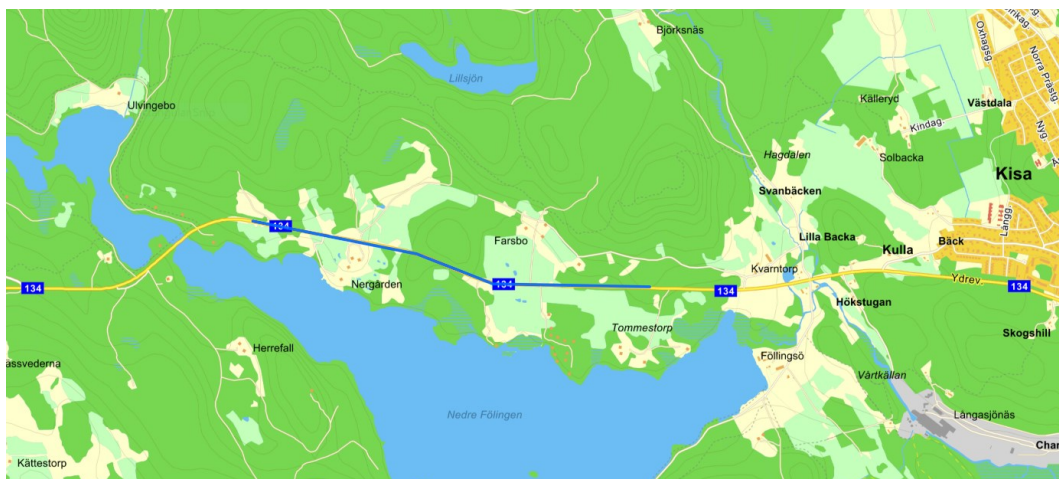
För en diskret serie av mätvärden $x_0, x_1, x_2, \dots$ och $v_0, v_1, v_2, \dots$ motsvarande tidpunkterna $t_0, t_0 + \Delta t, t_0 + 2\Delta t, \dots$ kan därmed följande överbestämda ekvationssystem för C_r och $C_d A$ ställas upp:

$$\begin{bmatrix} mgv_{\xi_1} \Delta t & 0.5\rho v_{\xi_1}^3 \Delta t \\ mgv_{\xi_2} \Delta t & 0.5\rho v_{\xi_2}^3 \Delta t \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_r \\ C_d A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.5m_{\text{eff}}(v_1^2 - v_0^2) - mg(z_1 - z_0) \\ -0.5m_{\text{eff}}(v_2^2 - v_1^2) - mg(z_2 - z_1) \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Egentligen varierar såväl m , ρ som v under intervallet Δt , men om intervallet är litet kan det antas att variationen är liten. För att uppnå formell andra ordningens noggrannhet med avseende på diskretiseringen Δt används medelvärden beräknade utifrån intervallernas ändpunkter så att exempelvis $v_{\xi_1} = (v_0 + v_1)/2$, $v_{\xi_2} = (v_1 + v_2)/2$ osv.

Försöksuppställning

Det studerade ekipaget (Figur 3) utgjordes av den femaxliga vagnen och bilen – en Scania R450 6x2 med fyra stakförsedda bankar. Försöket utfördes på riksväg 134 väster om Kisa den 5 oktober 2021. Vägen håller förhållandevis hög standard, men är inte så tätt trafikerad. Ett vägavsnitt på drygt två km utan tvära kurvor eller stora ojämnheter valdes ut. Vädret var torrt och svag vind rädde (0,5–1,5 m/s i medelvind, 1,2–2,7 m/s i maxvind för respektive försöksomgångar). För att registrera fordonets hastighet och position monterades en CAN-busslogger (Owasys 450), som via en induktiv givare läser av CAN-trafiken från fordonets kabelstam under instrumentbrädan. Utöver de nämnda signalerna registrerades även drivmedelsflöde, motorvarvtal och växlarval. De senare användes för att identifiera sekvenser av frirullning. Positionen ges av en GNSS-enhet i loggningsutrustningen, som arbetar med en kombination av satellit- och accelerometerdata.



Figur 2. Försökssträckan.

Tre aerodynamiska konfigurationer testades:

1. Bankarna på släpet sammandragna, kjolar på släpet
2. Bankarna på släpet särdragna, kjolar på släpet
3. Normal konfiguration med särdragna bankar och underkörningsskydd på släpet

Uppmätta signaler

Omedelbart före försöket vägdes fordonet inklusive föraren på en fordonsvåg. Därefter korrigerades vikten i varje tidpunkt utifrån förbrukad drivmedelsmängd. Vindstyrka och riktning på 2 m höjd uppmättes under försöket med manuell vindmätare på tre kontrollpunkter utefter teststräckan med några minuters mellanrum. Lufttrycket hämtades från SMHI:s mätstation i Horn (1018 kPa). Utelufttemperaturen, som påverkar luftens densitet och därmed luftmotståndet, mättes med fordonets egen temperaturgivare. Den varierade mellan 6,8 °C och 12,5 °C under försöket. Däcktemperaturen påverkar i viss mån rullmotståndet. Efter att varje konfiguration testats kontrollerades däcktemperaturen på bil och släp med hjälp av en handhållen IR-termometer. Fordonets hastighet uppmättes med en frekvens av 8 Hz, men nedsamlades till 1 Hz, vilket är uppdateringsfrekvensen för positionsangivelsen från loggningsenhetens GNSS-mottagare.

Mötande fordon kan ha en störande inverkan på försöket. Det var inte möjligt att stänga av vägen under försöket, men eftersom trafikintensiteten var låg antogs att inverkan var av mindre betydelse. Dock registrerades alla mötande fordon till antal och typ.

Höjdvärden

Ett typiskt värde på rullmotståndskoefficienten för tunga fordon är 0,007. Det ger en bromsande kraft motsvarande inverkan av ett motlut på 7 mm per meter. Det säger sig självt att noggrann information om vägbanans höjdvärde i varje punkt av frirullningssträckan är avgörande för försökets framgång, men de data som finns tillgängliga i Nationella vägdatatabasen (NVDB) är tyvärr inte tillräckligt precisa i sammanhanget. En noggrannare beskrivning av vägens höjdvärde togs därför fram utifrån punktmolnet från Lantmäteriets senaste laserskanning av området. Laserpunkternas position har en noggrannhet på 0,25 m i planet och 0,05 m i höjdd,

och genom medelvärdesbildning kan höjdvärdet i en given punkt bestämmas med en noggrannhet av uppskattningsvis 30 mm.

Koordinatspåret från GNSS-mottagaren kan ha ett lägesfel på ett par meter i förhållande till verkligt körspår. Man kan därför inte utgå ifrån att lastbilens rapporterade position verkligen ligger på vägbanan. För att ta bort inverkan av laserpunkter utanför vägen användes följande procedur: Först identifierades punkter tillhöriga vägbanan ur punktmolnet, varefter höjdvärdet i en önskad position beräknades som ett medelvärde av näraliggande punkters höjdvärde. Som näraliggande definierades punkter inom en radie av 1 m. Skulle registrerad position ligga utanför vägbanan utökades radien successivt tills minst tio punkter föll inom cirkeln. På så vis erhöles det mest sannolika höjdvärdet.

Försöket

För varje konfiguration utfördes fem utrullningar i vardera väst-östlig och öst-västlig riktning. Detta minskade vindens inverkan på resultatet (och i viss mån även inverkan från osäkerhet i vägbanans lutning). Fullständig stiltje rådde inte under försöket, men vinden var väsentligen östlig under hela försöket. Eftersom utrullningssektionen i huvudsak var parallell med vinden gjordes en kompensering av luftmotståndstermen i den kinetiska regressionsmodellen genom att, beroende på körriktning, subtrahera eller addera medelvindstyrkan. Utrullningarna genomfördes med tredje axeln på bilen samt femte axel på släpet lyfta



Figur 3. Timmerfordonet som användes vid utrullningsförsöket. Släpet är försett med turbulenshindrare kjolar och bankarna är manuellt sammandragna.



Figur 4. Den aerodynamiska kjolen i närbild.

Resultat

Tabell 3 visar de värden på C_r och $C_d A$, som försöket gav. Motsvarande värden på C_d ligger mellan 0,72 och 0,79 ($A = 10,4 \text{ m}^2$). Det har antagits att C_r har samma värde för de tre konfigurationerna. Värdet $C_r = 0,0074$ är i linje med vad som kan förväntas. För enskilda lastbilshjul brukar värden mellan 0,004 och 0,008 anges, men rullmotståndet påverkas av hjulinställningarna, och är i praktiken alltid högre än för enskilda hjul under optimala förhållanden.

Tabell 3. Resultat av utrullningsförsöket.

C_r	$C_d A$ – konfiguration 1: bankar + kjolar	$C_d A$ – konfiguration 2: kjolar	$C_d A$ – konfiguration 3: standard
0,0074	7,5	8,0	8,2

Utifrån dessa beräknade värden på $C_d A$ kan effekten av de två aerodynamiska åtgärderna redovisas, under antagande att de är additiva:

- Bankarna på släpet sammandragna reducerar $C_d A$ med $0,5 \text{ m}^2$.
- Kjolar på släpet reducerar $C_d A$ med $0,2 \text{ m}^2$.

I tabell 6 i Bilaga 1 redovisas de värden varje försöksrepetition (en vända tur och retur på teststräckan) gav utan koppling till de andra repetitionerna.

Osäkerheter

Två typer av osäkerheter påverkar resultatet av experimentet:

- Modellfel
- Mätosäkerhet

Den kinetiska modellen är enkel i det att den bara antar förluster av två typer: en som är hänförlig till rullmotståndet och oberoende av v , och en som styrs av luftmotståndet och är proportionell mot v^2 . I själva verket kan man anta att den del av drivlinan som alltid roterar med drivaxeln (inklusive hjullager) bidrar med en friktionskomponent som är oberoende av v , samt en viskös komponent som varierar proportionellt mot v . Vidare kan man tänka sig att även luftmotståndet har en komponent proportionell mot v , men vid de farter som är aktuella för fordonet är Reynolds tal så högt ($>10^6$) att överkritisk strömning råder med väsentligen konstant C_d samt v^2 -beroende hos motståndet. Mera problematiskt är i så fall en sidvind, vilken medför att både den effektiva frontarean och motståndskoefficienten förändras. Vid försöket rådde svaga vindar, och vindriktningen var i stort sett parallell med färdriktningen, varför de redovisade resultaten i sig är tillförlitliga. Hur representativa de är vid realistiska körförhållanden återstår att undersöka. Normalt antas en genomsnittlig sidvind på 5° .

Antagandet att rullmotståndet är oberoende av v är en förenkling. Enligt Wong (2008) har rullmotståndskoefficienten även en komponent proportionell mot v^2 , och är för ett lastbilsdäck av radialtyp

$$C_R = 0,006 + 0,3 \times 10^{-5} v^2.$$

Idealt vore det intressant att bestämma båda delar av rullmotståndskoefficienten genom regression. Eftersom experimentet utfördes utan att variera fordonets massa (förutom den i sammanhanget försumbara ändring som orsakades av kontinuerlig drivmedelsförbrukning) är luftmotståndskoefficienten och den v^2 -beroende delen av rullmotståndet dock inte samtidigt observerbara. Detta medför att det absoluta värdet på luftmotståndsfaktorn $C_d A$ inte kan bestämmas genom experimentet. Det utgör dock inget problem för kvantifiering av *skillnaden* mellan de tre konfigurationerna, som ju endast styrs av luftmotståndet. (Av allmänt intresse för tolkningen av resultaten är att den v^2 -beroende termen hos rullmotståndet, enligt Wongs värden, storleksmässigt motsvarar $0,87 \text{ m}^2$ av $C_d A$ för försöksfordonet.)

En faktor som är svår att kvantifiera i brist på information ur NVDB är den bromsande inverkan som fjädringsrörelserna ger upphov till. Rent viskösa dämpningsförluster bör vara proportionella mot v , men proportionalitetskonstanten varierar med vägytans ojämnheter. Dessutom sker mycket av en lastbils fjädringsrörelse mellan hytten och chassit, en rörelse som är ett komplicerat krängningsförlopp med tre frihetsgrader i förhållande till chassit. Eftersom samma teststräcka användes under hela försöket, och farten väsentligen var den samma vid olika passager av samma punkt, kan det antas att inverkan av osäkerhet beroende på fjädringsrörelser i alla fall inte har en avgörande påverkan på jämförelsen mellan de tre konfigurationerna.

Signalen för v mäts på framhjulen, och det kan antas att precisionen är hög. En procentuell felvisning måste dock förutsättas, främst beroende på osäkerhet i den effektiva hjulradien. Den senare påverkas av däcktryck och slitagenivå. För att kalibrera signalen jämfördes med värden beräknade från GNSS-signalen, som tidsmässigt är lågupplöst men har hög noggrannhet över tid. Sammantaget bör det kalibrerade värdet för v ha en noggrannhet på ca 0,1 m/s. Ett problem som tidigt observerades vid utvecklingen av mjukvaran för mätvärdesbehandlingen var att GNSS-signalen inte är synkroniserad med fordonets rörelse, utan behäftad med en viss eftersläpning. En analys av korskorrelationen mellan fordonets fartsignal och den från GNSS-mottagaren gav underlag för korrektion av tidsförskjutningen i positionsangivelsen.

Fordonet vägdes på en fordonsvåg som enligt kontrollerande företag (Scanvaegt) har en noggrannhet på 40 kg. Den främsta osäkerheten vad beträffar vikten är den roterande massan, som inte mättes utan uppskattades utifrån däcktillverkarnas uppgifter. Noggrannheten uppskattades till 300 kg.

Modellstabilitet

De osäkerheter som indata är behäftade med kan räknas om i genomslag på resultaten. Den största osäkerhetsfaktorn är vinden, som även om den var svag vid försöket förmodligen hade en påtaglig inverkan. Försummas vindkompensationen i regressionsmodellen blir $C_d A$ för de tre konfigurationerna 7,7, 8,2 respektive 8,5 m². I stort består alltså resultatet beträffande effekten, men med tendens till en viss överskattning. Ett fel på 300 kg beträffande den roterande massan ger ett fel om 13 procent i $C_d A$, men differensen mellan $C_d A$ för de olika versionerna påverkas bara ca en procent.

Modellrobusthet

I den kinetiska modellen för utrullningen ingick obekanta termer i v av grad noll och två. Man kan tänka sig att även en term av grad ett borde ingå. Normalt antar man inget sådant beroende hos vare sig rull- eller luftmotstånd (vilka är de dominerande förlusterna), men de delar av drivlinan som roterar med vid utrullningen bör bidra med förluster av viskös typ, vilka är proportionella mot v . Infogas en sådan term i modellen, och det antas att den är samma vid de olika försöken, ger regressionen ett ganska stort värde för termen på bekostnad av en minskning i $C_d A$ till runt 5 m². Det kan i sig uppfattas som problematiskt och motiverar en separat undersökning. Dock är skillnaderna mellan de tre varianterna i stort sett opåverkade, vilket är det väsentliga för innevarande studie.

Diskussion

Även om rull- och luftmotstånd i princip är observerbara kan det i praktiken vara svårt att skilja de två bromsande effekterna från varandra, om datasetet är litet. Dock är summan av energiförlusterna lättare att observera. Konsekvensen blir att fel i den ena variabeln tenderar att kompenseras av fel i den andra, fast med motsatt tecken. Därför är det nödvändigt att utföra regressionen med villkoret att rullmotståndet är lika för de tre konfigurationerna.

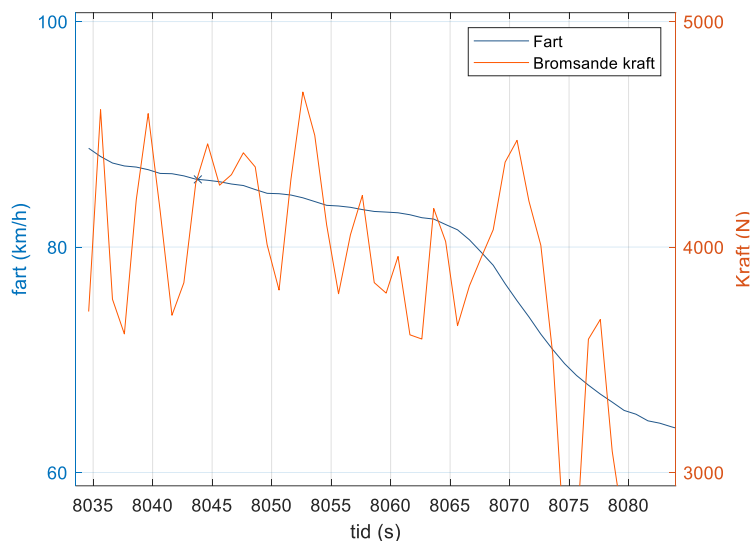
Däcktemperaturen höll enligt de mätningar som gjordes i stort sett samma nivå under hela försöket. I den mån en förändring var att vänta borde den vara långsamt ökande under varje delförsök och under dagen, dels på grund av uppvärmning orsakad av rullningen, dels på grund av den något stigande lufttemperaturen (från 7 °C vid försökets början till 12 °C när försöket avslutades). Delförsök två inleddes efter ett tio minuter långt stopp, varunder bankarna drogs ihop manuellt. Inför det sista delförsöket krävdes ett större monteringsarbete, vilket tog 78 minuter. Under den tiden hade däcken tid att svalna, men inte så mycket att de var kallare än inför starten av delförsök ett på morgonen, då ju lufttemperaturen var lägst. Det totala motståndet utgörs av rull- och luftmotstånd. Skulle en väsentlig förändring av däcktemperaturen ha missats borde den ha medfört ett gradvis något minskande rullmotstånd. Eftersom det senare antogs konstant i regressionsmodellen skulle den kalkylmässiga effekten ha blivit en sakta ökande underskattning av luftmotståndet. Kvalitativt kan alltså följande slås fast: den ökning i totalt motstånd som observerades mellan delförsök ett och tre kan inte tillskrivas ändrat rullmotstånd. På samma sätt skulle en icke-observerad högre genomsnittlig däcktemperatur under delförsök två än under de andra delförsöken ge underskattning av luftmotståndet för den konfigurationen, men en mindre överskattning av luftmotståndet för konfigurationerna ett och tre.

Det var inte möjligt att helt undvika inverkan av mötande trafik. Alla delförsök påverkades vardera av två mötande lastbilar, men under delförsök ett var antalet mötande personbilar lägre än i de andra försöken.

Tabell 4. Fordonsmöten under utrullningsförsöket.

Delförsök	Möten, personbil	Möten, lastbil
1	10	2
2	24	2
3	27	2

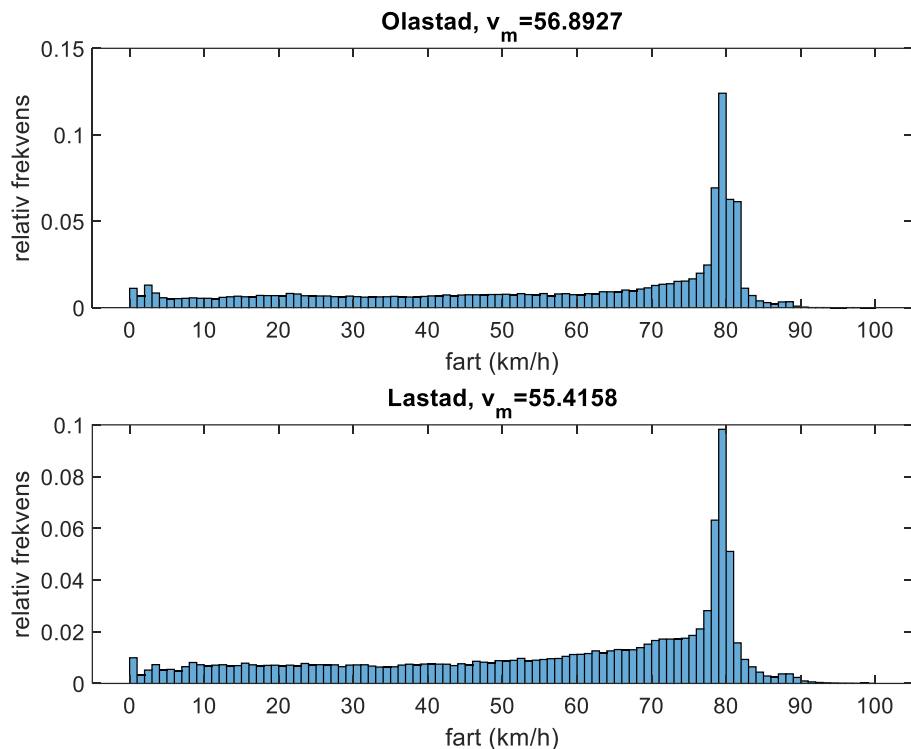
Mycket lite finns rapporterat om vad mötande trafik kan ha för inverkan på försök av det aktuella slaget, och effekten måste antas svårkvantifierbar. Ett mötande fordon ger upphov till en luftvirvel, som i sig påverkas av omgivande vindar, och det är inte uppenbart om ett enskilt möte totalt sett leder till en inbromsande effekt eller tvärt om. En undersökning av hur inbromsande krafter (krafter på fordonet förutom sådana orsakade av vägens lutning) beräknade från fordonets acceleration varierade under möten visade ingen tydlig koppling ens vid möten med stora fordon (Figur 5). Det kan därför antas att mötande fordon inte signifikant påverkat resultaten av försöket.



Figur 5. Inverkan av mötande lastbil vid utrullning, där "x" markerar tidpunkt för mötet.

Potential för bränslebesparing – en simulering

Hur stor reduktion i drivmedelsanvändning som de undersökta aerodynamiska åtgärderna ger styrs av en rad faktorer såsom fart, vind, drivlinans verkningsgrad, andel tomkörning och systemets vikt. En uppskattning av besparingspotentialen kan göras utgående från en statistisk fördelningsfunktion för fordonets körhastighet och antagandet att hela skillnaden i luftmotståndsarbete och rullmotståndsarbete under körningen motsvarar skillnaden i drivmedelsanvändning. (En användning av medelfarten ger en underskattning av förlusterna via luftmotståndet.) Modellen stämmer bra i flacka geografier, men kan bli något missvisande om körningen ofta kräver inbromsning i utförsbackar. Figur 6 visar ett typiskt histogram för farten. Om man antar att drivlinans termokemiska verkningsgrad är 42 procent och att energiinnehållet i drivmedlet är 35 MJ/liter, finner man att en reduktion av C_dA på $0,7 \text{ m}^2$ medför en besparing på 1,1 liter/100 km vid tomkörning. Skogforsk har genomfört en fordonsuppföljning av 19 rundvirkesfordon i hela landet under ett år, inkluderande högupplöst loggning av bland annat hastighet. Den luftmotståndsrelaterade besparingspotentialen för de observerade körprofilerna ligger mellan 1,0 och 1,4 liter/100 km, med ett medelvärde på 1,2 liter/100 km. De högre värdena gäller föga förvånande för fordon som framförs med hög genomsnittsfart. Vid körning med last är det endast kjolpaketets effekt som är aktuell. Om kjolarna minskar C_dA med $0,2 \text{ m}^2$ innebär det en besparing på 0,32 liter/100 km i lastat skick.



Figur 6. Histogram över hastighetsfördelningen för ett timmerfordon i södra Sverige under ett år.

Besparingen genom minskat luftmotstånd kan givetvis gå förlorad om åtgärderna ökar fordonets taravikt. Dels sker förlusten genom att rullmotståndet ökar, dels genom att den tillgängliga lastvikten minskar. Systemet för bankförskjutning med linjärakuator är än så länge på prototypstadiet, och det finns ingen uppgift om dess vikt. Målet är att installationen inte ska vara tyngre än existerande skjutbordssystem (utan upp till 150 kg lättare, enligt preliminära uppgifter). De 140 kg som kjolpaketet väger medför en ökning av rullmotståndsförlusterna på 0,065 liter/100 km. Det har här antagits en rullmotståndskoefficient på 0,007.

Vid tomkörning uppskattas nettobesparingen i genomsnitt till 1,1 liter/100 km.

Av olika skäl är inte alltid maximal tillåten bruttovikt begränsande för hur mycket ett fordon lastas. I de fall virket har låg densitet eller är krokigt är i stället den tillåtna lastvolymen begränsande. Grovt räknat kan antas att 30 procent av transportererna inte är viktbegränsade. För dessa transporter är besparingen vid 50 procents lastkörningsgrad i genomsnitt

$$0,50 \times (1,2 - 0,065) + 0,50 \times (0,32 - 0,065) = 0,70 \text{ [l/100 km]}.$$

I resterande 70 procent av fallen är besparingen

$$0,50 \times (1,2 - 0,065) + 0,50 \times (0,32 - 0) = 0,73 \text{ [l/100 km]},$$

eftersom ingen rullmotståndsökning är aktuell då maximal bruttovikt är begränsande. Däremot innebär minskningen i lastvikt att antalet transporter måste ökas. Om man antar en medelförbrukning (lika delar lastat och tomkörning) på 50 liter/100 km för ett

fordon vars medellastvikt är 47 ton motsvarar 140 kg minskad lastvikt en ekvivalent ökning av förbrukningen om

$$\frac{47}{47 - 0,14} \times 50 = 0,15 \text{ [l/100 km]}$$

för att på systemnivå utföra samma transportarbete, vilket alltså reducerar effektiviseringspotentialen till 0,58 l/100 km. Sett över tid skulle potentialen enligt kalkylen och antaganden ovan uppgå till

$$0,30 \times 0,70 + 0,70 \times 0,58 = 0,62 \text{ [l/100 km]}.$$

Beräkningarna ovan visar sammanfattningsvis att besparingspotentialen under realistiska användningsförhållanden motsvarar en reduktion av drivmedelsförbrukningen om 0,6 liter/100 km i genomsnitt. Detta under förutsättningen att bankförskjutningssystemet inte tillför extra vikt utöver de ca 400 kg som dagens skjutbord väger.

Släpen från bränsleuppföljningen är inte helt jämförbara med dem från utrullningsstudien. Om man grovt antar att skillnaden mellan ”fyra separerade stakpar” och ”stakarna sammandragna” är likvärdig med skillnaden mellan sex och fyra separerade stakpar finner man dock att den simulerade uppskattningen av besparingspotentialen är konsistent med resultaten från bränsleuppföljningen.

Slutsatser

Undersökningarna i denna studie visar att systemet med bankförskjutning och aerodynamiska kjolar kan minska bränsleförbrukningen för ett timmerfordon med 1–2 procent i genomsnitt utan att inverka menligt på användningen. Tvärt om kan bankförskjutning underlätta effektiv lastning. Huruvida det blir attraktivt att investera i systemet styrs naturligtvis av dess kostnad samt även av drivmedelspriset. Ett genomsnittligt timmerfordon körs 180 000 km per år. En procents minskning av en förbrukning på 40 l/100 km motsvarar då 720 liter drivmedel per år, eller 15 000 kr räknat på ett drivmedelspris om 21 kr per liter. Med en kalkylränta på 5 procent skulle en systemkostnad upp till 300 000 kr vara acceptabel, enbart sett till energieffektiviseringspotentialen.

Studien har behandlat användning för typiska timmerbilar, som i ganska stor omfattning körs på mindre vägar. Vid körning över längre avstånd i landsvägsfart ökar potentialen för energieffektivisering.

Referenser

Asmoarp, V., Enström, J., Bergqvist, M. & von Hofsten, H. 2018. Effektivare transporter på väg – Slutrapport för projekt ETT 2014–2016. Arbetsrapport 962, Skogforsk

Björheden, R., Gelin, O., Henriksen, F. & von Hofsten, H. 2018. ETT-push – virkesbil med fyra travar och hjälpdraft på linken. Arbetsrapport 980, Skogforsk.

FN/ECE/2015/1038. Föreskrifter nr 83 från Förenta nationernas ekonomiska kommission för Europa (FN/ECE) – Enhetliga bestämmelser om typgodkännande av fordon med avseende på utsläpp av föroreningar enligt kraven för motorbränslen.

Karlsson, M., Gårdhagen, R., Ekman, P., Söderblom, D. & Löfroth, C. 2015. Aerodynamics of Timber Trucks – a Wind Tunnel Investigation, SAE International. SAE 2015 World Congress & Exhibition.

Löfroth, C. & Gelin, O. 2015. ETTaero – En förstudie av aerodynamisk utformning av skogsfordon. Arbetsrapport 870, Skogforsk.

Svensson, G. & Löfroth, C. 2012. ETT – Modulsystem för skogstransporter. Arbetsrapport 758, Skogforsk.

Wong, 2008. Theory of ground vehicles. John Wiley & Sons.

Bilaga 1

Tabell 5. Data från bränsleuppföljningen. MSB är förkortning för Mönsterås bruk.

Bil	Lass nr	Aero	Startpunkt	Slutpunkt	Trip (km)	Ton (våg)	Liter diesel	l/100km
R480 2012	1	Nej	Kisa	MSB	142	65	74,9	52,75
R480 2012	1	Nej	MSB	Åtvid	163	17,2	47,1	28,90
R480 2012	2	Ja	Kisa	MSB	144	65,9	78,2	54,31
R480 2012	2	Ja	MSB	Djursdala	115	16,68	34,9	30,35
R480 2012	3	Ja	Kisa	MSB	143	60,45	67,7	47,34
R480 2012	3	Ja	MSB	Kisa	139	16,75	35,1	25,25
R480 2012	4	Nej	Kisa	MSB	143	68,8	78,3	54,76
R480 2012	4	Nej	MSB	Österby	139	17,13	41	29,50
R480 2012	5	Nej	Horn	MSB	137	64,35	73,7	53,80
R480 2012	5	Nej	MSB	Kisa	142	17,4	41,6	29,30
R480 2012	6	Ja	Kisa	MSB	142	63	79,8	56,20
R480 2012	6	Ja	MSB	Horn	138	17,03	36,6	26,52
R480 2012	7	Nej	Kisa	MSB	142	60,35	75,2	52,96
R480 2012	7	Nej	MSB	Horn	137	17,48	40,9	29,85
R480 2012	8	Ja	Kisa	MSB	144	66,65	87,8	60,97
R480 2012	8	Ja	MSB	Kisa	142	16,96	42,3	29,79
R480 2012	9	Nej	Kisa	MSB	143	66,7	80,8	56,50
R480 2012	9	Nej	MSB	Kisa	141	17,44	43,2	30,64
R480 2012	10	Nej	Kisa	MSB	142	65,45	76,7	54,01
R480 2012	10	Nej	MSB	Kisa	143	17,51	43,3	30,28
R480 2012	11	Ja	kisa	MSB	142	67,7	74	52,11
R480 2012	11	Ja	MSB	kisa	142	17,8	37,8	26,62
R480 2012	12	Ja	Kisa	MSB	142	69,95	77	54,23
R480 2012	12	Ja	MSB	kisa	143	16,83	41,8	29,23
R480 2012	13	Nej	Kisa	MSB	142	69	75,5	53,17
R480 2012	13	Nej	MSB	horn	136	17,35	41,8	30,74
R480 2012	14	Ja	horn	MSB	138	66,9	74,3	53,84
R480 2012	14	Ja	MSB	kisa	141	17,04	39,05	27,70
R450 2020	1	Ja	Kisa	MSB	147	69,45	76,2	51,84
R450 2020	1	Ja	MSB	Kisa	146	18,73	40,5	27,74
R450 2020	2	Nej	Kisa	MSB	147	70,1	78,8	53,61
R450 2020	2	Nej	MSB	Kisa	146	18,44	41,7	28,56
R450 2020	3	Ja	Kisa	MSB	147	70,1	77,1	52,45
R450 2020	3	Ja	MSB	Kisa	145	18,54	37,5	25,86
R450 2020	4	Ja	Kisa	MSB	147	68,4	71,9	48,91
R450 2020	4	Ja	MSB	Kisa	145	17,49	39,4	27,17
R450 2020	5	Ja	Kisa	MSB	147	70,25	71,8	48,84
R450 2020	5	Ja	MSB	Kisa	145	18,38	38,1	26,28
R450 2020	6	Nej	Kisa	MSB	147	69,05	73,7	50,14
R450 2020	6	Nej	MSB	Kisa	145	18,34	40,9	28,21

R450 2020	7	Ja	Kisa	MSB	147	69,6	71,3	48,50
R450 2020	7	Ja	MSB	Kisa	146	18,28	37,5	25,68
R450 2020	8	Nej	Kisa	MSB	148	71,9	76,7	51,82
R450 2020	8	Nej	MSB	Kisa	145	18,34	41,5	28,62
R450 2020	9	Nej	Kisa	MSB	146	68,95	70,7	48,42
R450 2020	9	Nej	MSB	Kisa	146	18,13	42,7	29,25
R450 2020	10	Nej	Kisa	MSB	148	68,7	71,7	48,45
R450 2020	10	Nej	MSB	Kisa	145	18,68	40	27,59
R450 2020	11	Nej	Kisa	MSB	146	70,25	73,9	50,62
R450 2020	11	Nej	MSB	Kisa	145	18,6	40,3	27,79
R450 2020	12	Ja	Kisa	MSB	148	70,5	75,4	50,95
R450 2020	12	Ja	MSB	Kisa	145	18,24	39,5	27,24
R450 2020	13	Nej	Kisa	MSB	147	66,3	73,2	49,80
R450 2020	13	Nej	MSB	Kisa	145	18,7	41,9	28,90
R450 2020	14	Ja	Kisa	MSB	147	70,05	72,8	49,52
R450 2020	14	Ja	MSB	Kisa	145	18,21	42,6	29,38
R450 2020	15	Ja	Kisa	MSB	147	70,35	74,1	50,41
R450 2020	15	Ja	MSB	Kisa	146	17,95	41,6	28,49
R450 2020	16	Nej	Kisa	MSB	147	70	71,1	48,37
R450 2020	16	Nej	MSB	Kisa	146	18,94	44,1	30,21

Tabell 6. Värden på rull- och luftmotstånd vid individuell regressionsanalys av varje utrullning, dvs. utan antagande att rullmotståndet är lika mellan olika utrullningar.

Koefficient	Repetition nr				
	1	2	3	4	5
Konfiguration 1: sammandragna bankar + kjolar.					
C_r	0,0091210	0,0080232	0,0075788	0,0072359	0,0071555
$C_d A$	6,9851928	7,1743185	7,3321953	7,3346864	7,0883313
Konfiguration 2: särdragna bankar + kjolar.					
C_r	0,0073453	0,0068712	0,0073122	0,0070547	0,0066056
$C_d A$	8,1088725	8,0180258	8,2565870	8,1262137	8,4189234
Konfiguration 3: särdragna bankar utan kjolar men med underkörningsskydd.					
C_r	0,0081223	0,0072550	0,0072322	0,0071927	0,0072496
$C_d A$	7,9050463	8,3238574	8,1056185	8,2645840	8,1307149