

Energibesparelse i vejtransporten.

Af: Per Ullidtz, Dynatest International
Bjarne Schmidt, Vejdirektoratet - Vejteknisk Institut
Birgitte Eilskov Jensen, NCC Roads A/S

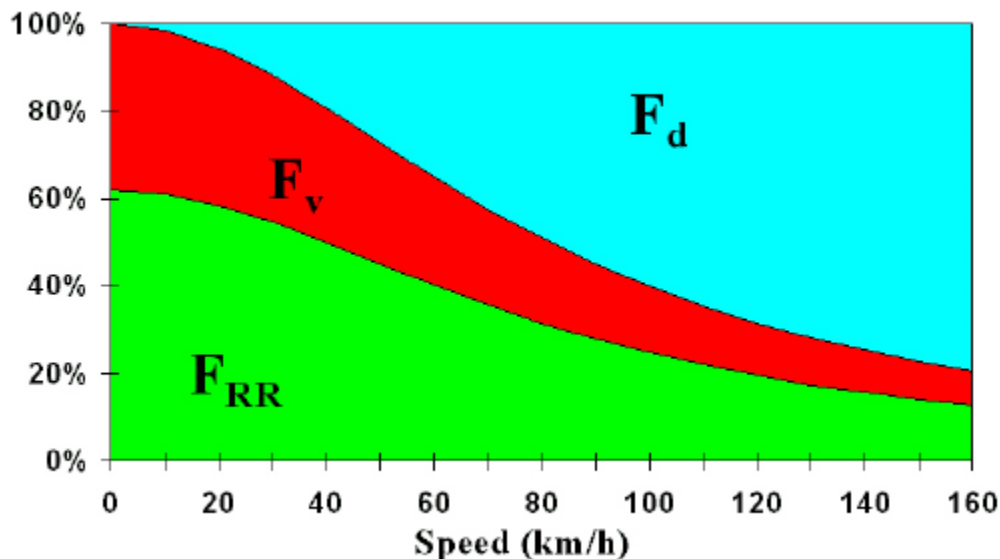
Med den konstante fokus på energiforbrug og hermed CO₂ udledning har NCC Roads, Vejteknisk Institut og Dynatest International indgået et samarbejde om at klarlægge mulighederne inden for Energibesparelse i vejtransporten som funktion af vejes funktionelle og strukturelle egenskaber.

Nedenstående udredning er et uddrag fra denne undersøgelse.

Energiforbruget ved vejtransport, og dermed udledningen af CO₂, kan reduceres gennem en målrettet indsats på belægningsiden. Det kan gøres gennem anvendelse af nye materialetyper og sammensætning, nye udlægningsteknikker og nye krav til vejbelægningernes funktionelle og strukturelle egenskaber.

Energitab ved vejtransport

Ved transport sker der energitab som følge af intern friktion i køretøjet, F_v , aerodynamisk modstand, F_d , og rullemodstand, F_{RR} . Et eksempel på de forskellige bidrag til energiforbruget er vist i Figur 1 (Beuving et al., 2004). Eksemplet er for en personbil. For en lastbil der kører med en konstant hastighed på 80 km/h angives i et andet eksempel en aerodynamisk modstand, $F_d = 38\%$, intern friktion $F_v = 12\%$ og rullemodstand $F_{RR} = 50\%$.



Figur 1 Fordelingen af energiforbrug til at overvinde aerodynamisk modstand, F_d , intern friktion, F_v , og rullemodstand, F_{RR} .

Som det ses giver rullemodstanden et betragteligt bidrag til energiforbruget og tiltag der kan reducere rullemodstanden bør derfor have stor opmærksomhed.

Rullemodstand

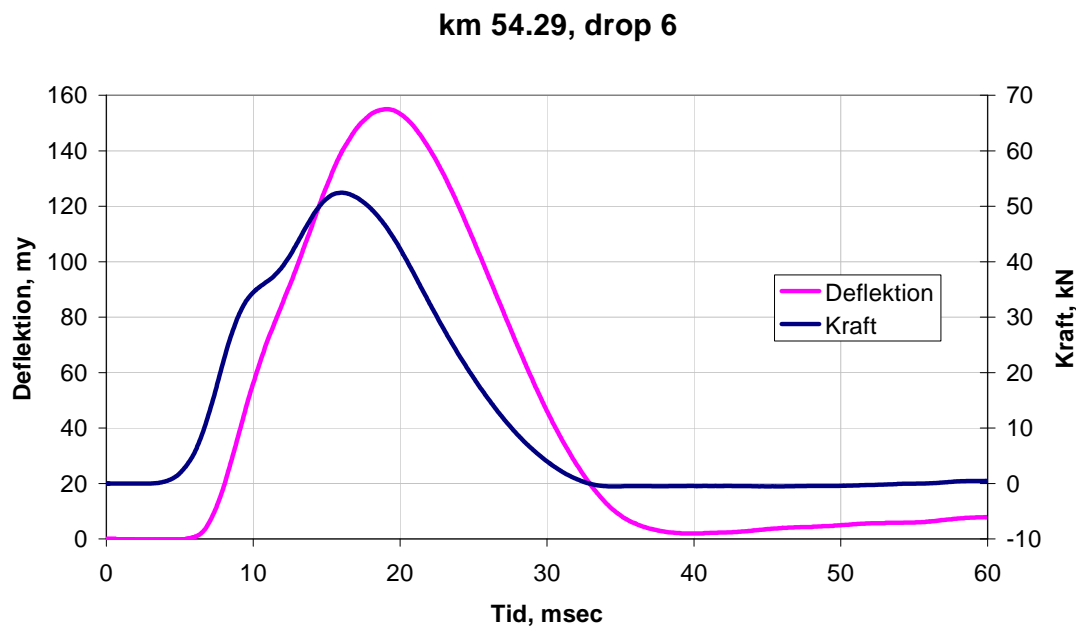
Rullemodstanden skyldes deformation af støddæmpere, C_s , makro deformationer af dækkasse og slidbane (dækkets sider og trædeflade), C_d , mikro deformationer i dækmaterialet fra vejens overfladestruktur ("friktion" mellem dæk og vejoverflade), C_f , og deformation af vejbefæstelsen, C_v . Størrelsen af de enkelte bidrag afhænger af en lang række faktorer så som dækkets opbygning, dækmaterialet, vejens jævnhed, vejens tekstur, befæstelsens stivhed, med mere.

Rullemodstanden på et hjul angives ofte som en koefficient af den lodrette belastning på hjulet, C_R , i lighed med friktionen. I litteraturen angives typisk værdier for den samlede rullemodstand, C_R , på mellem 0.008 og 0.014.

Dæktype og materiale har betydning for C_d og C_f , medens vejens funktionelle og strukturelle egenskaber har indflydelse på alle fire bidrag. Øget ujævnhed vil øge C_s og C_d , overfladestrukturen påvirker C_f , og befæstelsens opbygning C_v . Formålet med denne artikel er at belyse størrelsen af C_v i forhold til den samlede rullemodstand.

Bidrag til rullemodstand fra befæstelsens deformation

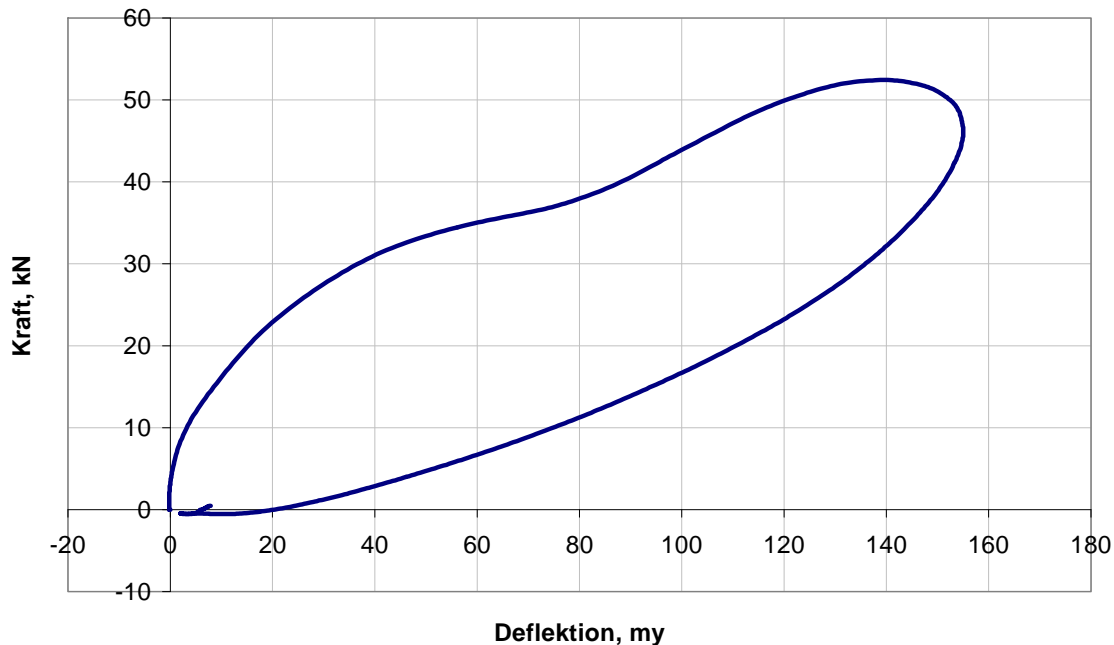
Den energi der kræves for at deformere en vejbefæstelse kan måles ved et faldlodsforsøg. Ved faldlodsforsøget kan hele forløbet af kraft og deformation bestemmes. Et eksempel på forløbet af kraften og deflektionen, i centret af belastningspladen, er vist i Figur 2.



Figur 2 Eksempel på kraft og deflektionsforløb ved faldlodsforsøg.

Det bør bemærkes at kraft og deflektion ikke er i fase. Deflektionens maksimalværdi er "forsinket" i forhold til kraftens maksimalværdi.

Hvis man afbilder kraften som funktion af deflektionen får man en hysteresekurve (eller arbejdslinie), som vist i Figur 3, for forløbet af kraft og deflektion i Figur 2. Energitabet (kraft gange vej) kan beregnes som arealet af hysteresekurven.

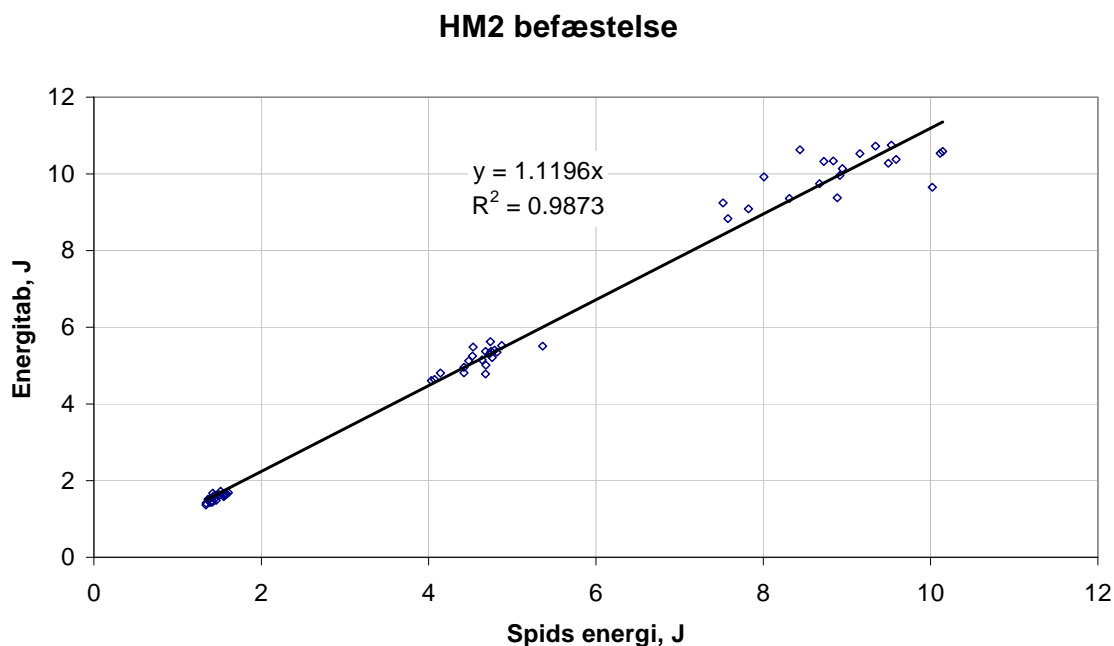


Figur 3 Hysterese kurve.

For at vurdere størrelsen af energitabet blev der gennemført en række faldlodsforsøg på tre forskellige vejbefæstelser: en ”almindelig” motorvejsbefæstelse (”Norm”), to befæstelser med ”høj modul” asfalt bærelag (”HM”) og endelig en befæstelse med et cementstabiliseret bærelag (”CG”). Forsøgene blev udført ved asfaltertemperaturer på 7 til 14 °C, ved tre faldhøjder (30, 50 og 70 kN) med tre slag for hver højde og med mindst 20 målepunkter for hver forsøgsserie.

Figur 4 viser et eksempel på energitabet som funktion af ”spids energien” beregnet som $\frac{1}{2} \cdot \text{maksimalkraften} \cdot \text{maksimaldeflektionen}$. Hvis vejbefæstelsen havde været en masseløs fjeder uden dæmpning ville spids energien være den maksimale input energi, men da det ikke er tilfældet, jævnfør Figur 2 og Figur 3, er den maksimale input energi noget højere (cirka halvanden gang).

For eksemplet i Figur 4 kan energitabet med god tilnærmelse bestemmes som $1,1196 \cdot \text{spids energien}$. Tilsvarende sammenhænge er etableret for alle forsøgstrækninger og måletidspunkter. Den rette lignings hældning og kvadratet på korrelationskoefficienten er angivet i Tabel 1. Befæstelsestypen er angivet som Norm for ”normal” befæstelse, HM1 og HM2 for de to høj modul befæstelser og CG for befæstelsen med cementstabiliseret grusbærelag.



Figur 4 Energitab som funktion af spids energi.

Tabel 1 Sammenhæng mellem energitab og spids energi.

Strækning	Hældning	R^2
HM2	1.1196	0.9873
HM1	1.0180	0.9633
CG	1.0415	0.9832
Norm	0.9739	0.9284

På grundlag af værdierne i Tabel 1 kan man med god præcision beregne energitabet ved en vilkårlig belastning.

Energitabet under et faldlodsforsøg kan ikke umiddelbart omsættes til en rullemodstand. Hvis man fordeler faldlodsforsøgets energitab over en vejlængde lig med faldlodspladens diameter (300 mm), får man en øvre grænse for rullemodstanden. Under et rullende hjul vil befæstelsen allerede være delvist deformeret foran hjulet. Den virkelige rullemodstand vil derfor kun være omkring 70-80% af den beregnede øvre grænse. Her er den øvre grænse dog anvendt.

Tabel 2 Gennemsnitligt energitab og rullemodstand.

Strækning	d(50 kN)	Energitab J	Rullemodstand N	Koefficient
HM2	150	4.2	14.0	0.000280
HM1	183	4.7	15.5	0.000310
CG	140	3.6	12.2	0.000243
Norm	233	5.7	18.9	0.000378

I Tabel 2 er normaliseret deflektion, i μm , energitab, i Joule og rullemodstand (øvre grænse), i Newton, angivet for hver strækning, svarende til den gennemsnitlige værdi ved en belastning på 50 kN. Det ses at rullemodstanden på befæstelsen med det

cementstabiliserede bærelag er omkring 35% mindre end rullemodstanden på normalbefæstelsen.

Energिताb og rullemodstand ved andre belastninger kan findes ved at multiplicere værdien i Tabel 2 med kvadratet på forholdet mellem den aktuelle belastning og 50 kN. For en personbil med en hjulbelastning på 5 kN vil rullemodstanden fra vejens deformation således være en hundrededel af værdierne i Tabel 2, medens rullemodstandskoefficient ville være en tiendedel.

Sammenligning med total rullemodstand på hjul

Rullemodstanden på de fire befæstelser blev målt med et udstyr fra det tekniske universitet i Gdansk. Modstanden blev målt med to forskellige dæk, et SRTT (Standard Reference Test Tyre, ASTM) og et AVON dæk. Hjulbelastningen var mindre end 3 kN, så rullemodstandskoefficienten fra deflektionen ville være mindre end en tiendedel af værdierne i Tabel 2. Modstanden blev målt ved to hastigheder, 50 km/h og 80 km/h, undtagen på ”normal” befæstelsen (på to ramper) hvor der kun blev målt med 50 km/h. Her er modstanden ved 50 km/h anvendt. Modstanden ved 80 km/h var fra 2 til 10 % højere.

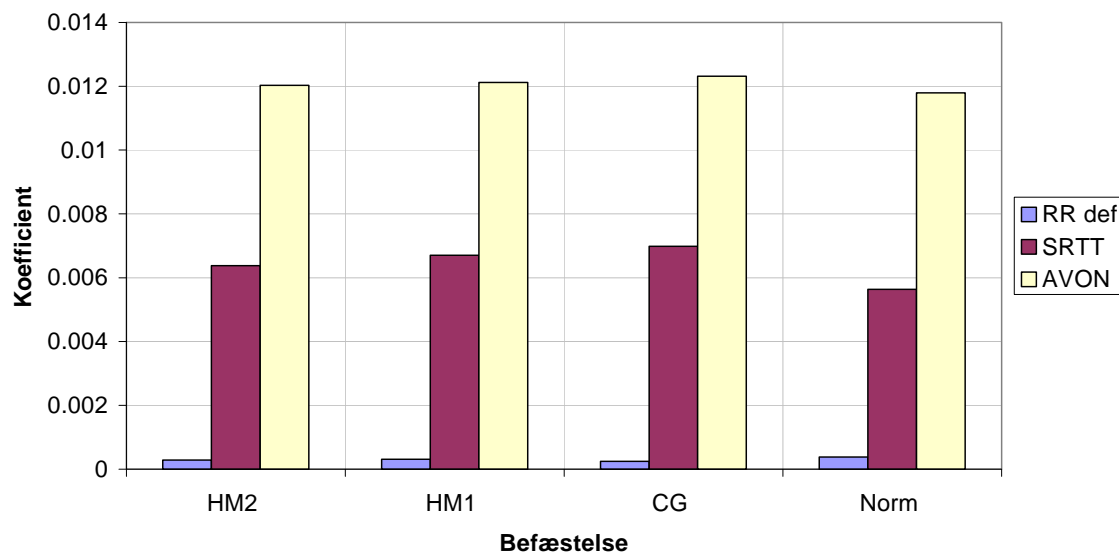
I Figur 5 er rullemodstandskoefficienterne fra faldlodsforsøgene (RR def) sammenlignet med modstandskoefficienterne målt på de rullende hjul for de forskellige befæstelser. Modstandskoefficienterne fra deflektionen svarer til en belastning på 50 kN, og burde egentlig divideres med godt ti for at svare til måleudstyrets belastning.

I Figur 6 er rullemodstandskoefficienten under de rullende hjul afbildet som en funktion af deflektionsmodstanden ved 50 kN. Selv om der er rimeligt høje korrelationskoefficienter må det bero på en tilfældighed, da den totale rullemodstand falder med voksende deflektionsmodstand (CG befæstelsen med den laveste deflektionsmodstand har den højeste totale rullemodstand).

Konklusion

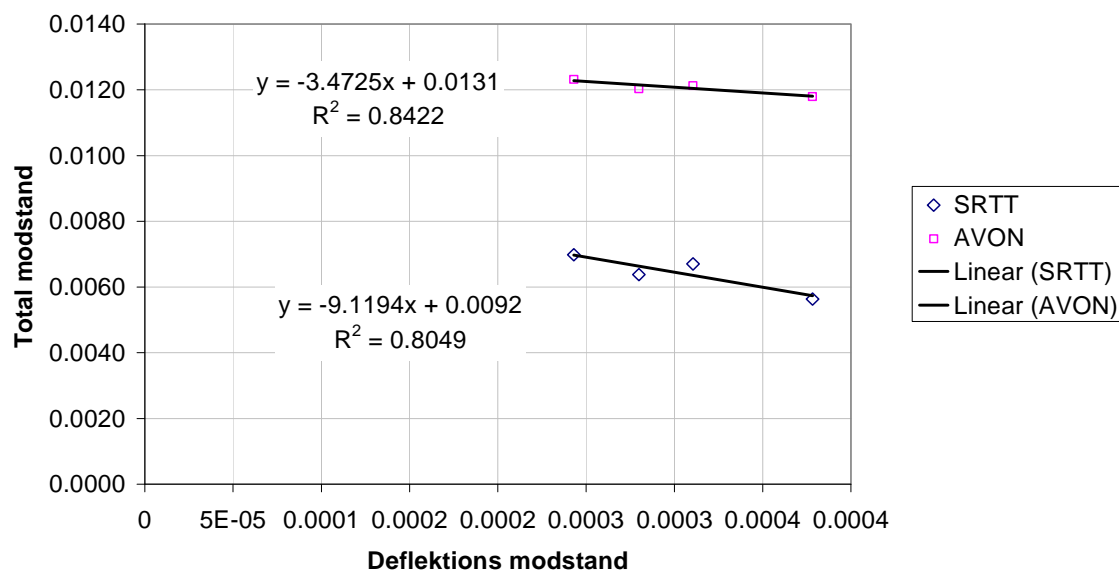
Den del af rullemodstanden som skyldes vejens deformation ses at være meget beskeden, og det er derfor meget begrænset hvor stor en effekt der kan opnås, på energiforbruget, ved at anvende stivere bærelagsmaterialer. Selvom den del af rullemodstanden som skyldes vejens deformation helt kunne fjernes ville det maksimalt give en reduktion på 4% af den samlede rullemodstand for lastbiler, og væsentlig mindre for personbiler. På betydeligt svagere vejbefæstelser kunne der måske blive tale om et bidrag på op til 20%. Hvis en øget stivhed kan opnås, uden at det har andre uheldige konsekvenser, bør det naturligvis gøres, men den primære indsats for at reducere vejtransportens energiforbrug må rettes mod vejens jævnhed og overfladestruktur.

Rullemodstand fra defleksion og totalt



Figur 5 Sammenligning af rullemodstandskoefficienter fra defleksion og målt på hjul.

Total modstand som funktion af deflektions modstand



Figur 6 Relation mellem deflektions og total modstand.

Referencer

E. Beuving, T. De Jonghe, D. Goos, T. Lindahl & A. Stawiarski "Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements", Industry Report, Eurobitume, March 2004.