

NCC GREEN ROAD®

Udviklingsrapport 01/10

Den energibesparende vej

Energibesparelse i vejtransporten som funktion af
vejes funktionelle og strukturelle egenskaber.

Teknisk rapport



Dato: Maj 2010
Forfattere: Bjarne Schmidt, Vejdirektoratet og
Per Ullidtz, Dynatest
Status: Ekstern rapport



FORVENT LIDT MERE

NCC Roads A/S
Fuglesangsallé 16
6600 Vejen
Telefon: 79 96 23 23
Telefax: 79 96 23 24
E-post: asfalt-vejen@ncc.dk
Hjemmeside: www.ncc.dk

NCC GREEN ROAD®

Udviklingsrapport 01/10

Den energibesparende vej

**Energibesparelse i vejtransporten som funktion af
vejes funktionelle og strukturelle egenskaber.**

Teknisk rapport

Dato:	Maj 2010
Forfattere:	Bjarne Schmidt, Vejdirektoratet og Per Ullidtz, Dynatest
Følgegruppe:	Ole-Jan Nielsen, NCC Roads og, Birgitte Eilskov Jensen, NCC Roads
Status:	Ekstern rapport
Nummerering:	Udviklingsrapporter nummereres med fortløbende nummer og årstal
Ekstern rapport:	Eftertryk i uddrag er tilladt med kildeangivelse

Indholdsfortegnelse

Forord.....	4
Preface.....	5
Sammenfatning	6
Indledning	8
Definitioner af rullemodstand	9
Faktorer som influerer på rullemodstanden	14
Vejens jævnhed og dens indflydelse på rullemodstand og energi forbrug ...	14
Vejens tekstur og dens indflydelse på rullemodstand og energiforbrug.....	15
Vejbelægningens bæreevne og dens indflydelse på rullemodstand og energiforbrug.....	17
Vejbelægningens materiale og dens indflydelse på rullemodstand og energiforbrug.....	27
Konklusion.....	33
Referencer	34

Forord

I efteråret 2008, udarbejdede NCC-Roads og Vejteknisk Institut i samarbejde en ansøgning til NCC's forretningsudviklingsråd, vedrørende et fællesnordisk pilotprojekt i NCC Roads regi og under ledelse af NCC Roads, DK. Ansøgningen resulterede i en bevilling således at projektet kunne gennemføres i et samarbejde mellem NCC-Roads, Vejdirektorat, Vejteknisk Institut og Dynatest, Danmark A/S.

Projektets formål var at frembringe denne rapport og herigennem belyse mulighederne for at nedbringe vejtransportens energiforbrug ved om muligt at anvende specielle belægningstyper. Rapporten skal efterfølgende danne grundlag for en eventuel etablering af forsøgsbelægninger med lav rullemodstand hvorpå måling af rullemodstand og energiforbrug skal foretages. Derudover skal en eventuel videreførelse af projektet vise at der kan opnås en samfundsmæssig gevinst ved at udskifte eksisterende asfaltbelægninger med energibesparende belægninger.

Preface

In the autumn of 2008, NCC-Roads and the Danish Road Institute wrote a project proposal for the NCC business development council. It concerned a common Nordic project under the management of NCC Roads, Denmark, investigating the possible benefits in developing new pavement types. The aim is to provide low rolling resistance and hence contribute to a major reduction in road transport energy consumption. The project proposal was granted funding and was carried out as a cooperation between NCC Roads, Denmark, Dynatest, Denmark A/S and the Danish Road Institute

This report provides a state of the art survey for reducing road transport energy consumption. The focus is on road pavement characteristics known to influence road transport energy consumption and the influence of different pavement types on rolling resistance. It is anticipated that this report will form the basis for a continuation of the project which will include development of low rolling resistance pavements, test sections, measurements of rolling resistance and energy consumption. Furthermore, a continuation of the project will visualize the benefit for the society by replacing existing road pavements with energy reducing pavement types.

Sammenfatning

Den europæiske vejtransport er den næst største bidragsyder med hensyn til udledning af drivhusgasser og er en af de få energikrævende sektorer hvor emissionsraten er stigende. Mens EU generelt har reduceret udledningen af drivhusgasser med lidt under 5 % i årene 1990 til 2004 er CO₂ emissionen fra vejtransporten steget med ca. 26 %, og står alene for 12 % af den totale CO₂ emission i Europa.

Igennem de seneste år har EU Kommissionen gjort flere tiltag for at reducere CO₂ emissionen og dermed energiforbruget fra vejtransporten. Dette er blandt andet foregået gennem regulativ foranstaltninger af køretøjers emission og energiforbrug, senest Euro 5- og Euro 6-krav hvis formål er at mindske forureningen fra lette og mellem store køretøjer.

Selvom der indføres krav til bilindustrien om at reducere CO₂ udledningen mener man fra EU's side, at det ikke er tilstrækkelig at se på den enkelte sektor indenfor vejtransporten, hvis der skal ske en væsentlig reduktion af energiforbruget, men at det er nødvendigt, at den samlede vejtransport sektor arbejder tæt sammen, for at reducere energiforbruget. CO₂ emissionen fra vejtransport sektoren er betinget af det behov der er for transport, transportens fleksibilitet og infrastrukturens kvalitet.

Energiforbruget ved vejtransport er betinget af en mængde faktorer som er betinget af køretøjet og infrastrukturen samt interaktionen mellem disse to. Ser man alene på hvorledes en vejbelægnings tilstand og kvalitet influerer på rullemodstanden og dermed på energiforbruget siger en tommelfingerregel at rullemodstanden resulterer i ca. 20 % af den CO₂ der udledes af personbiler og ca. 30 % af den CO₂ der udledes af tunge køretøjer.

Dækindustrien har kunnet tilbyde vejbrugerne dæk med lav rullemodstand siden 1993 og det anslås at disse dæk andrager ca. 50 % af de dæk der i dag sælges til personbiler.

For vejbelægningernes vedkomne viser nye undersøgelser fra Sverige (ref.3) at rullemodstanden er betinget af vejens jævnhed, tekstur og kørselshastigheden. Således viser undersøgelsen, at rullemodstanden øges ca. 2 % ved en forøgelse af ujævnheden med en enhed ved en hastighed på ca. 50 km/t og ca. 6 % når hastigheden øges til ca. 90 km/t..

Ligeledes vil rullemodstanden øges med ca. 17 % ved en hastighed på 50 km/t og 30 % ved en hastighed på 90 km/t, når teksturen øges med en enhed.

I Dansk Vejtidskrift nr. 11, 2008 er der i artiklen ”Vejen til fremtiden” angivet at brugen af belægningstyper med en stor stivhed kan reducere brændstofforbruget og dermed reducere CO₂ udledningen med 5 – 7 %.

Faldlodsforsøg udført i projektet og afrapporteret i rapporten viser dog at stivhedens betydning for en reduktion af brændstofforbruget når det gælder motorvejsbefæstelser maksimalt andrager nogle få procents af den samlede rullemodstand, og kun for tunge belastninger.

Alt i alt er der store muligheder for at reducere energiforbruget og dermed mindske CO₂ udledningen fra vejtransportsektoren gennem en målrettet indsats på belægningssiden. Nye materialetyper, nye udlægningsteknikker og nye krav til vejbelægningernes egenskaber er parametre som kan have en betydelig indvirkning på den samlede energibesparelse og dermed bidrage væsentligt til den af EU Kommissionen ønskede samlet reduktion af energiforbruget og CO₂ emissionen.

Mulighederne for at reducere energiforbruget ved at benytte nye og til formålet målrettede belægningstyper står endnu at blive løst til fulde.

Ligeledes ses der et umiddelbart behov for at få kortlagt de initiativer som er udført eller i gang i Danmark og på internationalt plan. En sådan kortlægning kan danne grundlag for etablering af et udviklingsprojekt hvis formål er at udvikle nye belægningstyper, som giver en betydelig reduktion af rullemodstanden og dermed energiforbruget, uden at miste de egenskaber som har betydning for vejbrugernes komfort, sikkerhed og støj.

Indledning

Denne rapport indeholder resultatet af et litteraturstudium og redegøre for mulighederne for at udvikle nye og transportenergibesparende vejbelægninger som skal bidrage til at den globale udledning af CO₂ og dermed energiforbruget i transportsektoren sænkes til gavn for klimaet.

Resultatet af kortlægningen samt efterfølgende workshops skal danne grundlag for en beslutning om der skal iværksættes et udviklingsprojekt, med det formål at udvikle energibesparende vejbelægninger.

Projektfaser:

Definitionsfasen – Hvad menes med energibesparende vejbelægninger, hvilke krav skal stilles til at man kan sige at en vejbelægning er energibesparende for transportsektoren.

På baggrund af definitionsfasen indsamles erfaringer fra ind og udland omkring energibesparende vejbelægninger. Indsamling af erfaringsmaterialet vil foregå gennem et litteraturstudie samt henvendelser til entreprenører, vejadministrationer og andre interessenter i og udenfor Danmark.

Det indsamlede materiale vil blive evalueret og beskrevet i en ”state of the art” rapport.

Definitioner af rullemodstand

Rullemodstand er den modstand der opstår når et rundt objekt som for eksempel en kugle eller et hjul ruller på en flad overflade. Rullemodstanden opstår primært ved at objektet og overfladen deformeres.

Derudover vil faktorer som hjulets radius, hastighed, overfladeadhæsion og det relative mikro-slip mellem hjulets og overfladens kontaktflade bidrage til rullemodstanden, hvilket er betinget af de materialer som hjulet og overfladen er lavet af.

Et gummi-hjul vil give en større rullemodstand end et stålhjul og en overflade af sand vil give en større rullemodstand end en vejbelægning af asfalt eller beton.

På grund af rullemodstanden vil et frit rullende køretøj på hjul gradvist miste sin hastighed som følge af den interaktion der sker mellem hjulenes og overfladernes materialer. Sammenligner man en bus og et tog, som har samme masse, vil et tog med stålhjul der kører på stålskiner bevæge sig længere end en bus med gummi-hjul som kører på en normal vejbelægning fordi rullemodstanden mellem de to stålmaterialer er mindre end rullemodstanden mellem et gummi-hjul og en vejbelægning.

Society of Automotive Engineers, SAE, definerer rullemodstand som;

“Rullemodstand - Modstand mod bevægelse er betinget af;

1. Friktion i hjulophæng,
2. Friktion i dæk opbygning og dækmønster som følge af deformationer i dækket, når dette ruller hen over en vejbelægning,
3. Vejens deformation,
4. Vejoverfladens tekstur og dennes indtrængning i dækket,
5. Luftmodstanden på hjulene.

Dækfirmaet Michelin angiver at et dæks rullemodstand kan opdeles i:

- Aerodynamikken som andrager 0 – 15 %
- Dækkets hysteres karakteristisk som andrager 80 – 95 %
- Friktion mellem dæk og vej som andrager < 5 %

Dækkets hysteresse, som bidrager med den væsentligste del af rullemodstanden beskriver gummiets evne til at modstå deformation. Det betyder generelt at lave hysteresse egenskaber giver gode dæk egenskaber i vådt føre og høj hysteresse mindsker rullemodstanden.

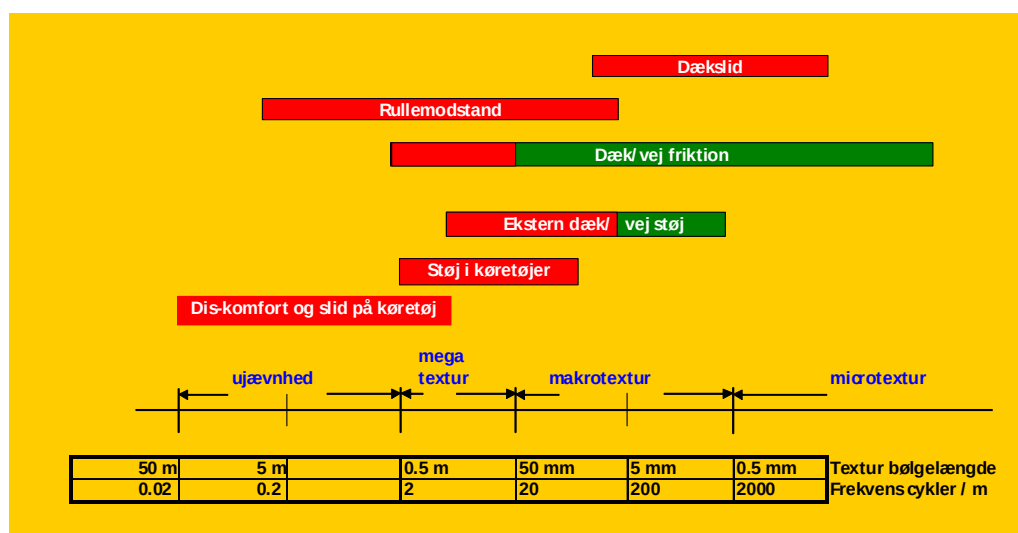
Rullemodstanden er resultatet af energitab i dækmønsterets gummi og dækkets side vægge. Energitabet i dækmønsteret opstår gennem den omtalte hysteresse. Hysteresen opstår når dækmønsteret bevæger sig gennem kontaktfladen mellem dækket og vejoverfladen og dermed bliver belastet indtil dette når midtpunktet af kontaktfladen hvorefter det aflastes i bevægelsen fra midten og til bag kanten af kontaktfladen. Dette sammen med energitabet i forbindelse med hysteresse i dækkets sider giver en trykfordeling som ikke er symmetrisk omkring trædefladen og er større tryk i den første halvdel af kontaktfladen. Den resulterende kraft vil derfor ikke optræde i centret af kontaktfladen, men lidt foran. Forskellen mellem normalkraften på dækket og hysteressekraften, er den kraft der giver modstand mod den fremadrettede bevægelse, altså rullemodstanden.

Disse dæk egenskaber er væsentlige at tage med i betragtning når man skal se på den optimale interaktion mellem dæk og vejbelægning i forhold til rullemodstanden.

Derudover er der adskillige andre mekanismer som påvirker den totale rullemodstand

Et af målene med projektet er at definere hvad der menes med energibesparende vejbelægninger, og hvilke krav der skal stilles før end man kan sige at en vejbelægning er energibesparende for transportsektoren. Derfor er det væsentligt at se på hvilke faktorer der har en indflydelse på rullemodstanden når vi ser på et gummihjul og en vejbelægning.

PIARC, World Road Organisation, opstillede i begyndelsen af 1990'erne en sammenhæng mellem en vejbelægnings overfladekarakteristika, udtrykt ved bølgethed og dennes effekt for vejbrugerne. Sammenhængen er angivet i figur 1.



Figur 1. PIARC's definitioner på vejkarakteristik udtrykt ved bølgelængde og vejbrugerens oplevelser.

Som det fremgår af figur 1, opstår den største rullemodstand i bølgeområdet fra ca. 5 mm til ca. 10 m. Det vil sige, at det ikke kun er vejbelægningens tekstur der bidrager til en øget rullemodstand, men også vejens jævnhed, primært i det korte bølgeområde. Derfor er det også denne del af vejens karakteristika som man bør optimere, hvis rullemodstanden skal reduceres.

Det er væsentligt, at hvis man ønsker at optimere vejbelægningens egenskaber i forhold til rullemodstand, at belægningerne ikke derved mister de egenskaber som er vigtige for trafiksikkerhed, støj og komfort. I dag stiller vi krav til både jævnhed og friktion. En forbedring af jævnheden vil give en reduktion i rullemodstanden, fordi jævne veje giver mindre dynamiske bevægelser i dæk, fjedersystemer etc. Friktionen derimod er vanskeligere at tackle. Som nævnt ovenfor vil rullemodstanden øges, når hysteresen i dækkets trædeflade øges. Dette sker netop ved, at man øger vejgrebet gennem en større og mere skarp tekstur, dette har til gengæld har en positiv effekt på friktionen.

Da det er vigtigt at forholde sig til friktionen fordi denne netop kan blive negativ påvirket ved en eventuel optimering af belægningen bør vi se på de mekanismer i belægningsoverfladen som skaber en god friktion mellem dæk og vejbane. Friktionen kan den opdeles i en *statisk* og en *kinetisk* friktion.

Den statiske friktion forhindrer, at et køretøj, som er parkeret på en bakke begynder at rutsje. Hvis køretøjet begynder at rutsje, skabes den kinetiske friktion gennem bevægelsesenergien mellem dækket og vejoverfladen.

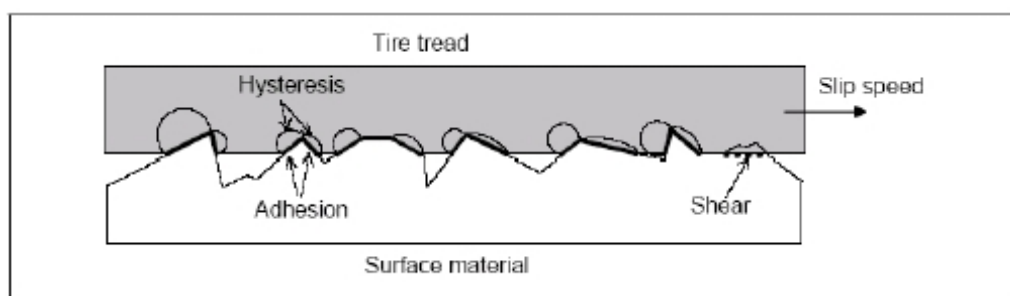
For et køretøj, som bevæger sig med et frit rullende hjul, vil det udelukkende være den statiske friktion som er til stede. Denne opstår på grund af de tidligere omtalte hysterese kræfter. Disse hysterese kræfter sikrer, at køretøjet bliver på vejen.

I de tilfælde, hvor det er nødvendigt at bremse køretøjet, vil den statiske friktion blive bevaret, så længe køretøjets hastighed svarer til hjulenes hastighed. Denne situation er den normale standsning af et køretøj under en kontrolleret opbremsning.

Hvis køretøjet opbremses så kraftig, at der opstår en forskel mellem køretøjets hastighed og hjulhastigheden, skabes en kinetisk friktion, når hjulene begynder at glide over belægningen.

I en opbremsningsproces optræder som grundregel 3 hovedelementer:

1. Adhæsion mellem dæk og vejbane.
2. Hysterese i de kræfter som optræder i de elastiske deformationer i den del af dækket som teksten påvirker.
3. Dækslid som følge af brud i dækket i fladen mellem dæk og vej.



Figur 2. De 3 hovedelementers indflydelse [ref. 4].

Som det ses af figur 2 er teksturens betydning for friktionen tydelig. Generelt angives, at adhæsiionskræfterne er proportionale med adhæsiionsarealet mellem dækket og teksten. Hysterese kræfterne optræder som tidligere nævnt på grund af dækkets visko-elastiske egenskaber og dermed de deformationer, der opstår i dækket, når det hviler på en vejoverflade. Disse er en funktion af hastigheden.

Generelt siges det at ved lave hastigheder dominerer mikroteksturen friktionsniveauet både når belægningen er våd og når den er tør.

Ved højere hastigheder vil en stor makrotekstur sikre at vandet drænes væk fra overfladen således at de adhæsive komponenter af friktionen som stammer fra mikroteksturen genetableres. Hysteresekræfterne friktionen øges potentielt med hastigheden og ved hastigheder over 90 km/t bidrager hysteresekræfterne med 90 % af friktionen.

Teksturens betydning for både rullemodstanden og friktionen er essentielle for at optimere for begge parametre. Derfor er det vigtigt at få en forståelse for teksturens indflydelse og hvordan den kan bevares på en optimal måde gennem en vejbelægnings livsforløb. Dette bliver givetvis en af de væsentligste udfordringer når nye belægningstyper med lav rullemodstand skal udvikles.

Faktorer som influerer på rullemodstanden

Vejens jævnhed og dens indflydelse på rullemodstand og energi forbrug

Ser man i litteraturen for så vidt angår jævnhedens indflydelse på rullemodstanden og energiforbruget er det som oftest IRI, International Roughness Index, som benyttes som mål for vejbelægningernes jævnhed.

Anden litteratur som f.eks. Descornet 1990 (ref.1) belyser, at det hovedsagelig er megateksturen (50 til 500 mm bølgelængde) som giver det største bidrag til rullemodstanden og at der er en mindre sammenhæng mellem rullemodstand og energiforbrug i forhold til IRI.

Det kan også diskuteres om IRI er det korrekte mål for moderne køretøjers respons eller dynamiske egenskaber, idet IRI er baseret på en amerikansk fremstillet personbil fra 1968. Årsagen til, at man benytter IRI som mål for jævnheden er at indekset er et internationalt anerkendt indeks.

Forholder vi os til udsagnene fra Descornet (ref.1) om, at det er megateksturen som har den afgørende indflydelse på rullemodstanden, vil man ikke kunne opnå en robust sammenhæng mellem rullemodstand og IRI. I Anttii Leinonens rapport (ref.2) viser en opgørelse over resultaterne fra en række internationale forsøg som har analyseret sammenhængen mellem rullemodstand og IRI, at der gennemsnitlig opnås en forøgelse af brændstofforbruget på ca. 1.5 % for personbiler, når IRI stiger med en enhed (f.eks. fra 1 til 2 m/km). Rapporten viser dog, at der er stor usikkerhed omkring den faktuelle procentdel og at den kan variere fra ca. 0.4 til 3.6 %. For lastbiler, viser rapporten, at andelen er højere, ca. 4 % pr. IRI enhed.

I ECRPD projektet, "Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation", rapport D5's, "Road surface effects on rolling resistance – coastdown measurements with uncertainty analysis in focus", (ref.3) viser en litteraturundersøgelse at ved en kørselshastighed på 54 km/t og når IRI forøges med en enhed stiger rullemodstanden med ca. 2 %. Ved en kørselshastighed på 90 km/t stiger rullemodstanden med ca. 6 %.

Tilsvarende viser rapporten, at når IRI stiger fra 1 til 10 m/km, det vil sige fra en ny og meget jævn vej, til en slidt og meget ujævn vej, så stiger brændstofforbruget med 2 til 16 %.

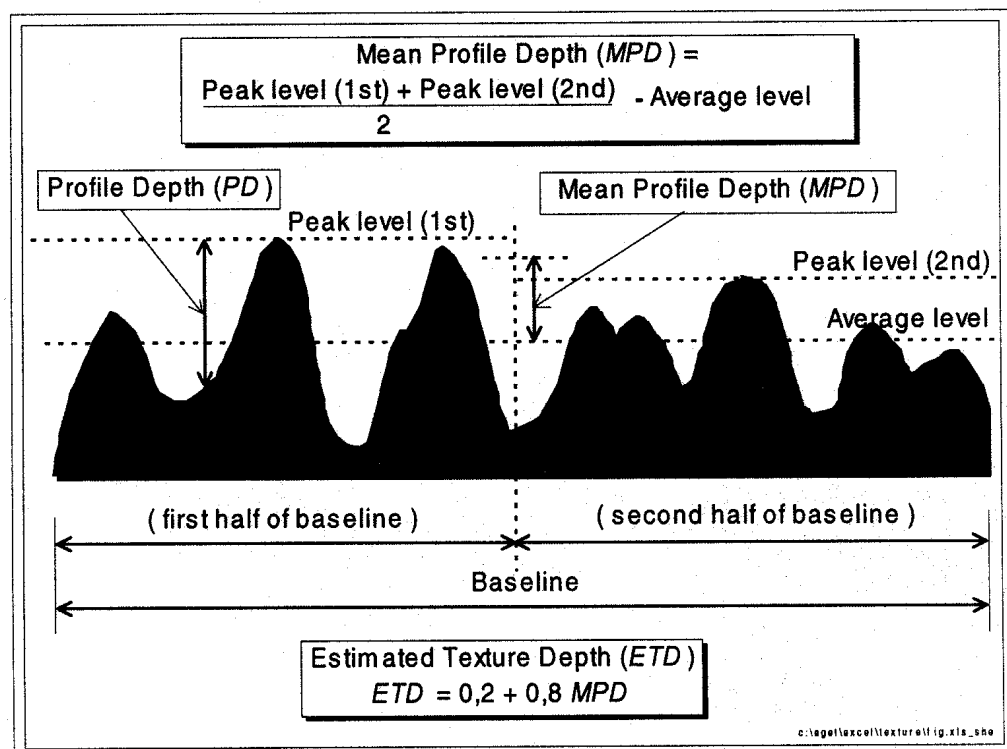
I rapporten "Pavement smoothness and fuel efficiency" af Missouri Department of Transportation, USA, (ref.4) viser man resultatet af en undersøgelse hvor man har studeret ændringen af brændstofforbruget på en række vejstrækninger når man forbedrede jævnheden ved at udlægge et nyt slidlag. Undersøgelserne viser at en forbedring af jævnheden med 53 %, fra ca. 2 m/km til 0.9 m/km, resulterer i en forbedring af brændstofforbruget med ca. 2.5 %.

Federal Highway Administration i USA, (ref.5) sponserede et forsøg på den såkaldte Westrack, hvor føre løse lastbiler kører på en lukket bane. Ved dette forsøg undersøgte man brændstofforbruget over en tre måneders periode på en række belægninger før og efter en slidlagsfornyelse. Kriteriet for belægningens tilstand var IRI og dette blev målt til 2.4 m/km før det nye slidlag og 1.2 m/km efter at nyt slidlag var lagt på. Det målte brændstofforbrug før vedligeholdelsen var 1.78 km/l og efter vedligeholdelsen 1.86 km/l, hvilket gav ca. 4.8 % ændring i forbruget.

Vejens tekstur og dens indflydelse på rullemodstand og energiforbrug

Som nævnt tidligere har vejbelægningens tekstur en væsentlig indflydelse på rullemodstanden og dermed energiforbruget som er krævet for at drive køretøjet fremad.

Sammenholder vi tekstur og rullemodstand er det hovedsagelig MPD, Middel Profil Dybden, bestemt ved ISO standard 13473-2, og angivet i figur 3 af belægningens tekstur størrelse som benyttes.



Figur 3. Definition af MPD, Middel profil dybde.

ECRPD rapporten (ref.3) angiver en række sammenhænge mellem MPD og rullemodstand ud fra forskellig litteratur bl.a. nævnes at:

Sandberg 1997 (ref.6) viser, at når MPD stiger fra 0.3 mm til 3 mm sker der en forøgelse af rullemodstanden fra 8 til 84 %, hvorimod ECRPD undersøgelsen viser at for den samme ændring i MPD ved en kørselshastighed på 54 km/t øges rullemodstanden med ca. 17 %.

Ved en kørselshastighed på 90 km/t øges rullemodstanden med ca. 30 %.

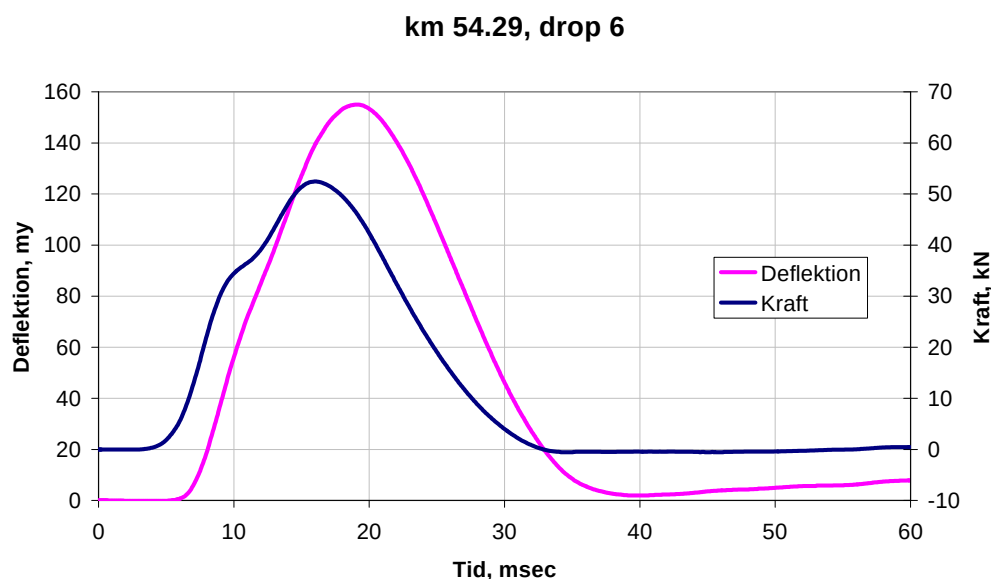
Så selv om MPD benyttes som et måltal for en sammenhæng mellem belægningstilstand og rullemodstand, ses der at være store forskelle i sammenhængen. Dette kan skyldes at MPD tallet repræsenterer den store makrotekstur og ikke afspejler hele makroteksturområdet. Sammenlignet med Descornet's udsagn (ref.1) om at det er megatexturen som har den største indflydelse på rullemodstanden, er det dog væsentligt at se på, hvilke af vejbelægningens egenskaber som påvirker dækket og hysteresse kræfterne. Efter opfattelse bør man have en bedre kortlægning af tekturen, end den der er givet af MPD tallet.

Det er muligt med den eksisterende laserteknologi at detekterer teksturegenskaber med en væsentlig større opløsning end det der opnås med MPD. Det vil dog kræve et ekstra stykke forskningsarbejde at udvikle en teksturalgoritme som beskriver hele teksturområdet.

Vejbelægningens bæreevne og dens indflydelse på rullemodstand og energiforbrug

Et af de mange energitab ved vejtransport skyldes at det kræver energi at deformere selve vejbefæstelsen. At måle denne del af energitabet under et rullende hjul er meget vanskeligt, fordi der, som beskrevet ovenfor, er mange andre bidrag til energitabet. Hvis den del af energitabet, som skyldes befæstelsens opbygning (materialer og lagtykkelser), skal minimeres, er det imidlertid nødvendigt at vide hvor stort det er på forskellige befæstelser. For at bestemme hvor stor den del af energitabet der skyldes deformationen af vejbefæstelsen blev der udført en række faldlodsforsøg på forskellige typer af befæstelser, herunder en "normal" befæstelse, befæstelser med højmodul asfalt (HM, for en del af asfalten) og en befæstelse med cementbundet grus (CG).

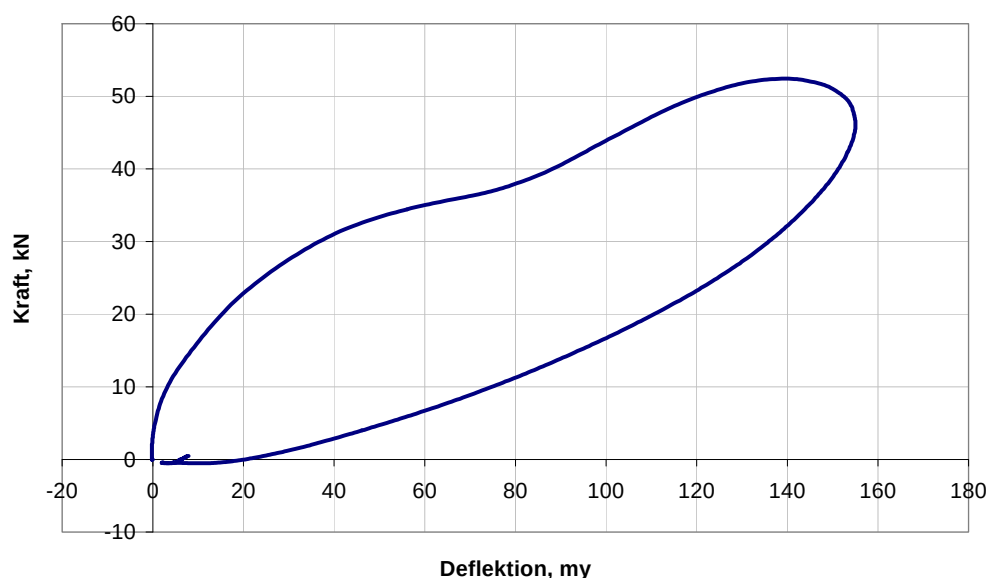
Ved faldlodsforsøget kan hele forløbet af kraft og deformation bestemmes. Et eksempel på forløbet af kraften og deflektionen, i centret af belastningspladen, er vist i Figur 4.



Figur 4. 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, som vist i Figur 5, for kraft- og deflektionsforløbet i Figur 4.



Figur 5. Hysteresekurve.

Energitabet (kraft gange vej) kan beregnes som arealet af hysteresekurven.

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.

Forsøgenes omfang

Alle forsøg blev udført på motorvej 64, rute 18 syd for Herning. Der blev målt på 6 strækninger:

Område 1: Høj modul asfalt type 2 (HM2), km. 53.911 – 54.315 sydgående spor.

Område 2: Høj modul asfalt type 1 (HM1), høj deflektion, km. 55.607 – 55.680, sydgående spor.

Område 3: Høj modul asfalt type 1 (HM1), lav deflektion, km. 55.680 – 55.876 sydgående spor.

Område 4: Befæstelse med CG, km. 55.876 – 56.193, sydgående spor.

Område 5: ”Normal” befæstelse, frakørselsrampe, km. 53.65 – 54.02 nordgående spor.

Område 6: ”Normal” befæstelse, tilkørselsrampe, km. 54.22 – 54.40 nordgående spor.

Der blev udtaget 3 borekerner fra hvert område. Ud fra de udtagne borekerner er der følgende befæstelsesopbygning i de 6 områder:

HM type 2, km. 53. 911 – 54.315:

30 mm SMA 11, bitumen (40/60)

36 mm ABB 11, bitumen (35/50)

57 mm ABB 16, bitumen (35/50)

132 mm GAB II, bitumen (35/50)

200 mm SG

360 mm BL

HM type 1 høj deflektion, km. 55.607 – 55.680:

29 mm SMA 11, bitumen (40/60)

54 mm ABB 16, bitumen (40/60)

99 mm GAB II, bitumen (20/30)

200 mm SG

360 mm BL

HM type 1 lav deflektion, km. 55.680 – 55.876:

27 mm SMA 11, bitumen (40/60)

53 mm ABB 16, bitumen (40/60)

123 mm GAB II, bitumen (20/30)

200 mm SG

360 mm BL

Befæstelse med CG, km. 55.876 – 56.193:

24 mm AB 8å, Microville 8, bitumen (modificeret)
62 mm ABB 16, bitumen (40/60)
200 mm CG
200 mm SG
360 mm BL

Normal befæstelse, frakørselsrampe km. 53.65 – 54.02 :

30 mm SMA 11, bitumen (40/60)
55 mm ABB 16, bitumen (40/60)
84 mm GAB II, bitumen (40/60)
200 mm SG
400 mm BL

Normal befæstelse, tilkørselsrampe km. 54.22 – 54.40 :

34 mm SMA 11, bitumen (40/60)
50 mm ABB 16, bitumen (40/60)
68 mm GAB II, bitumen (40/60)
200 mm SG
400 mm BL

Bitumendata i () er fra Vejdirektoratets belægningsoversigt, ligesom angivelse af SG og BL tykkelser er fra belægningsoversigten.

På de første 4 forsøgsstrækninger blev der i juni 2009 udført faldlodsforsøg ved 2 forskellige temperaturforhold, morgen (12-23 °C) og eftermiddag (25-30 °C). Målingerne udførtes tirsdag den 16ende juni, med første måleserie mellem kl. 6 og 9 og anden serie mellem 13 og 17. Målingerne blev udført i det lette spor, mellem hjulsporene. Fra km 53.93 til km 54.31 blev der udført målinger i både sydgående og nordgående retning. På hver strækning og for hver temperatur blev der udført forsøg i (mindst) 20 punkter.

Forsøgene blev udført med 3 faldhøjder og 3 slag for hver højde (ved cirka 30, 50 og 70 kN). Resultater for alle slag blev gemt, og for det sidste slag ved hver højde gemtes også det tidsmæssige forløb af kraft og deflektioner. Der anvendtes et geofon setup med afstande 0, 200, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500 og 1800 mm, og 300 mm plade.

Asfalttemperaturen blev målt i en dybde mellem 60-100 mm og overfladetemperaturen og lufttemperaturen blev målt ved hvert forsøgspunkt. Asfalttemperaturen varierede fra 12 til 30 °C. Den gennemsnitlige lufttemperatur den 15ende juni var 12.5 °C (til BELLS temperatur).

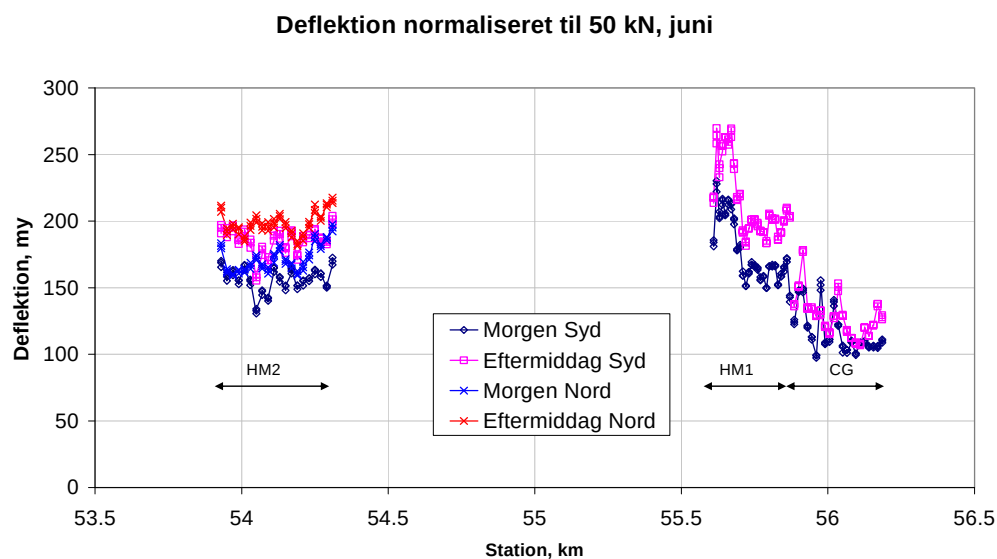
Da rullemodstandsmålingerne blev gennemført i det tunge spor, blev faldlodsforsøgene suppleret med en ny serie målinger den 15ende oktober 2009, med målinger i alle 6 områder, men i det tunge spor. Måleproceduren var den samme som for forsøgene i juni. Den gennemsnitlige lufttemperatur den 14ende oktober var 2.8 °C. Asfalttemperaturen under faldlodsforsøgene den 15ende oktober varierede fra 7 til 14 °C.

Resultater

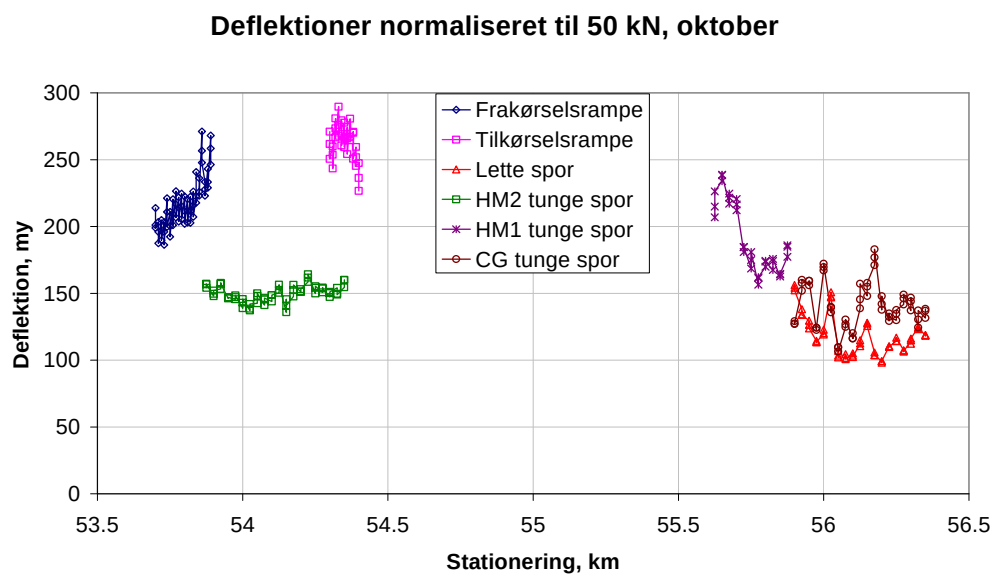
De normaliserede deflektioner fra juni forsøgene er vist i Figur 6. Deflektionerne er vist for det sidste (tredje) slag ved hver faldhøjde, og er normaliseret til en spidsbelastning på 50 kN.

Det fremgår at befæstelserne er omtrent lineært elastiske, og at deflektionerne, som forventet, er højere om eftermiddagen, hvor asfalttemperaturen er højere, end om morgenen. Befæstelsen med CG har de mindste deflektioner, men også den største spredning i deflektioner.

Befæstelsen med et højmodul asfalt type 2 (HM2) har to signifikant forskellige delstrækninger. Den ene af disse delstrækninger (område 2) har de højeste deflektioner, medens den anden (område 3) har deflektioner på samme niveau som befæstelsen med HM1 (og som de højeste deflektioner for CG befæstelsen). Noget af forskellen skyldes den større asfalttykkelse i område 3 end i område 2.



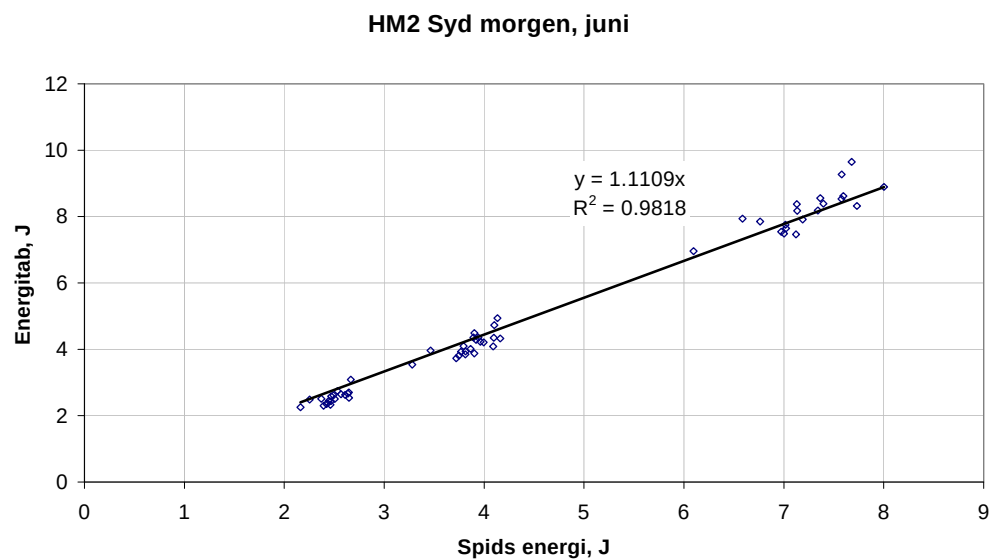
Figur 6. Normaliserede deflektioner fra juni måling.



Figur 7. Normaliserede deflektioner fra oktober måling.

Figur 7 viser de normaliserede deflektioner fra oktober målingen. ”Normal” befæstelsen på ramperne har større non-linearitet end de øvrige befæstelser, men ellers er mønsteret det samme som for juni målingerne. På CG strækningen har det lette spor mindre deflektioner end det tunge.

Figur 8 viser energitabet som funktion af spids energien beregnet som $\frac{1}{2} \cdot \text{maksimal-kraften} \cdot \text{maksimaldeflektionen}$. 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 4 og Figur 5, er den maksimale input energi højere (cirka halvanden gang).



Figur 8. *Energitab som funktion af spids energi.*

For målingerne på befæstelsen med høj modul asfalt af type 2 (HM2) i sydgående retning om morgenen i juni måned (Figur 8) kan energitabet med god tilnærmelse bestemmes som $1.1109 \cdot \text{spids energien}$. Tilsvarende sammenhænge er etableret for de øvrige forsøgstrækninger og måletidspunkter. Den rette lignings hældning og kvadratet på korrelationskoefficienten er angivet i Tabel 1. Strækningerne er angivet som HM1, HM2 og CG, retningen (S eller N) som næste bogstav og M eller E for henholdsvis morgen og eftermiddag, for juni målingerne, og med sidste bogstav "O" for oktober målingerne, hvor "Norm" angiver normalbefæstelsen på ramperne.

Tabel 1. Sammenhæng mellem energitab og spids energi.

Strækning	Hældning	R ²
HM2 S M	1.1109	0.9818
HM2 S E	1.1166	0.9848
HM2 N M	1.0919	0.9873
HM2 N E	1.0966	0.9846
HM1 S M	0.9637	0.9560
HM1 S E	0.9826	0.9590
CG S M	0.9664	0.9738
CG S E	0.9719	0.9716
HM2 O	1.1196	0.9873
HM1 O	1.0180	0.9633
CG O	1.0415	0.9832
Norm O	0.9739	0.9284

Tabel 2. Gennemsnitligt energitab og rullemodstand.

Strækning	D (50 kN)	Energitab J	Rullemodstand N	Koefficient
HM2 S M	156	4.3	14.4	0.000289
HM2 S E	185	5.2	17.2	0.000344
HM2 N M	172	4.7	15.7	0.000313
HM2 N E	198	5.4	18.1	0.000362
HM1 S M	176	4.2	14.1	0.000283
HM1 S E	214	5.3	17.5	0.000350
CG S M	123	3.0	9.9	0.000198
CG S E	129	3.1	10.4	0.000209
HM2 O	150	4.2	14.0	0.000280
HM1 O	183	4.7	15.5	0.000310
CG O	140	3.6	12.2	0.000243
Norm O	233	5.7	18.9	0.000378

I Tabel 2 er energitab og rullemodstand (øvre grænse) angivet for hver strækning svarende til den gennemsnitlige deflektion ved en belastning på 50 kN. Energitab og rullemodstand ved andre belastninger kan findes ved at multiplicere værdien i Tabel 2

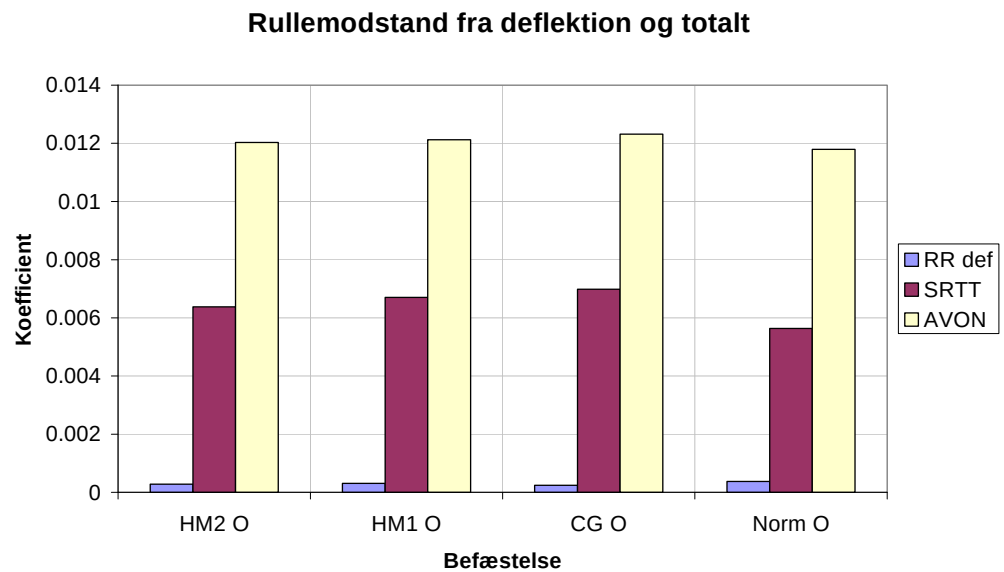
med kvadratet på forholdet mellem den aktuelle belastning og 50 kN (koefficienten dog kun med forholdet).

Rullemodstandskoefficienten i Tabel 2 er forholdet mellem rullemodstanden og belastningen (50000 N). Den samlede rullemodstand, inklusive den rullemodstand der skyldes vejens overfladeegenskaber, angives normalt til et område mellem 0.006 og 0.035, for eksempel nævner Hans Bendtsen ”Rolling resistance, fuel consumption – a literature review”, Danish Road Institute, Technical note 23, 2004 (ref. 7), at rullemodstanden i et forsøg varierede fra 0.012 til 0.02 når teksturdybden voksede fra 0 til 4 mm.

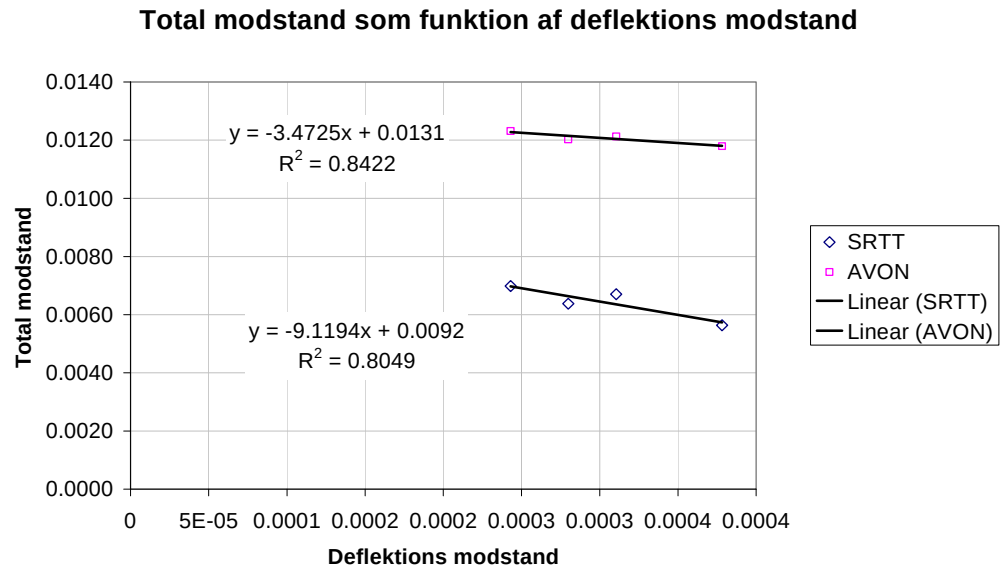
Rullemodstanden blev målt på de sidste fire strækninger i Tabel 2, med to forskellige dæk, et SRTT (Standard Reference Test Tyre, ASTM) og et AVON dæk. Hjulbelastningen var mindre end 3 kN, så rullemodstandskoefficienten fra deflektionen ville være mindre end en tiendedel af værdierne i Tabel 2. Modstanden blev målt ved to hastigheder, 50 km/h og 80 km/h, undtagen på ramperne 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 9 er rullemodstandskoefficienterne fra faldlodsforsøgene (RR def) sammenlignet med modstandskoefficienterne målt på de to 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 10 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 deformationsmodstand har den højeste totale rullemodstand).



Figur 9. Sammenligning af rullemodstandskoefficienter fra deflektion og malt på hjul.



Figur 10. Relation mellem deflektions og total modstand.

Det fremgår at den del af rullemodstanden der skyldes deformationen af vejbefæstelsen maksimalt beløber sig til nogle få procent af den samlede modstand, for nærværende befæstelser. For svagere vejbefæstelser ville tabet fra deformationen formentlig kunne udgøre 20% eller mere af den samlede rullemodstand for tunge belastninger.

Vejbelægningens materiale og dens indflydelse på rullemodstand og energiforbrug.

Spørgsmålet om belægningens stivhed har en indflydelse på rullemodstanden og dermed energiforbruget er et væsentligt spørgsmål ikke kun set i forhold rullemodstanden, men også set i forhold til den strategiske vedligeholdelse af vejinfrastrukturen. I litteraturen er beskrevet flere forsøg, hvor man har forsøgt at belyse eventuelle fordele, ved at benytte en stivere belægningstype end asfalt. Dette er primært amerikanske undersøgelser, hvor brugen af betonbelægninger er udbredt, men også i Sverige er lavet undersøgelser.

California Department of Transportation (Caltrans) (ref.8) har udført en undersøgelse i 2008, hvor man har målt og sammenlignet brændstofforbruget ved kørsel på henholdsvis beton og asfaltbelægninger.

Undersøgelsen viste, at der var en marginal, men dog signifikant, forskel på en beton- og asfaltbelægning. Kørsel på betonbelægningen udviste et ca. 2% mindre brændstofforbrug end ved kørsel på asfaltbelægningen. Andre forsøg i denne undersøgelse viste en forbedring på ca. 1 % i brændstofforbruget ved kørsel på beton i forhold til asfalt. En opsummering af resultaterne fra Caltrans forsøgene viste følgende:

Tabel 3. opsummering af Caltrans forsøg.

Udførte forsøg		Reduktion af brændstofforbrug
Effekt af kørselshastighed		6.5 % for hver 8 km/t hastigheden reduceres
Asfalt vs Beton	Teststrækning I-80	2 – 3 % i betonbelægningens favør
Fræsning af beton for at forbedre jævnhed, IRI		Ca. 1.8 – 2.7 % for hver reduktion af IRI med 0.8 m/km
Effekt af dæktryk ved beton og asfalt		1 – 1.7 % for hver 4 psi forøgelse af dæktrykket
Asfalt vs beton	Test strækning I-5	0 – 1 % i betonbelægningens favør (ikke statistisk signifikant)

En ting at bemærke ved disse forsøg er, at belægningernes tekstur, MPD, ikke er oplyst, så selv om man kan se en forskel mellem de to belægningstyper synes der at mangle denne væsentlige oplysning.

National Research Council i Canada (ref.9), har udført lignende forsøg.

Disse viser, at ved en kørselshastighed på 100 km/t på en jævn belægning, IRI $\sim 1 - 2$ m/km opnåede man et lavere brændstofforbrug ved betonbelægningerne end ved asfaltbelægningerne i størrelsesordenen 0.8 – 1.8 %.

Igen som for de amerikanske forsøg er belægningernes tekstur ikke oplyst hvilket ses som en stor mangel.

I en svensk undersøgelse, fra VTI (ref.10), undersøgte man brændstofforbruget ved kørsel på henholdsvis beton og asfaltbelægninger. Målingerne blev udført med en personbil som var udstyret med instrumenter, som præcist kan måle brændstofforbruget. Ligesom jævnheden, IRI, og tekstur, MPD, blev målt. Generelt fandt man, at brændstofforbruget på betonbelægningen var lavere end for asfaltbelægningen, ca 1.1 %. Jævnheden for de to test strækninger var for betonbelægningen 1.2 m/km og for asfaltbelægningen 0.7 m/km. Teksturen var derimod mindre for betonbelægningen ca. 0.5 mm og for asfaltbelægningen ca. 0.9 mm. Ser man overordnet på dette resultat, er det nærliggende at tro, at den faktor som har haft den afgørende betydning for brændstofforbruget er teksturen, idet den har været næsten dobbelt så stor for asfaltbelægningen end for betonbelægningen. Forskelligheden i IRI mellem de to teststrækninger er så lille, at det er vanskeligt at vurdere jævnhedens betydning for resultatet.

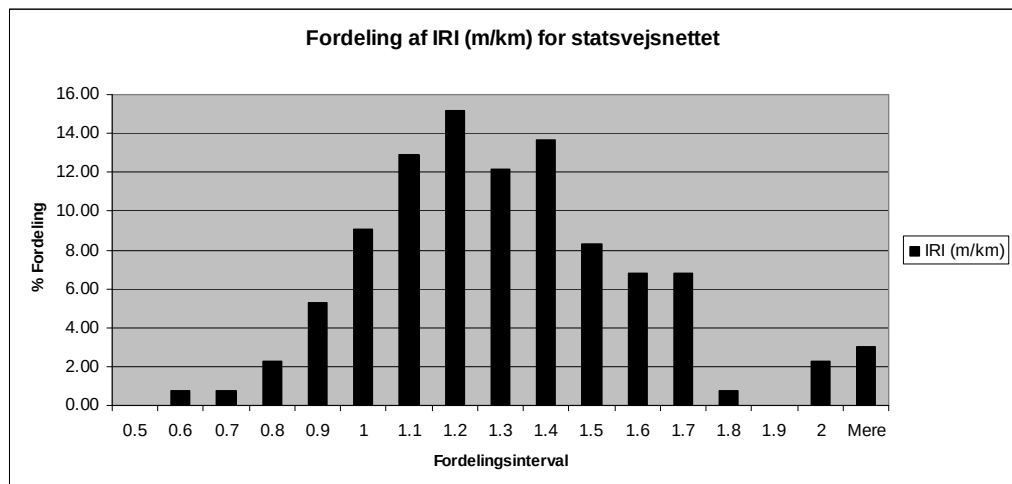
I rapporten er programmet VETO benyttet. Programmet som er udviklet på VTI, benyttes til beregning af brændstofforbrug, når de vejtekniske parametre som IRI og tekstur er kendte.

Rapporten sammenligner målte og beregnede brændstofforbrug og konkluderer at programmet VETO med god sikkerhed kan beregne prognoser for brændstofforbrug for vejbelægninger, med kendte parametre.

Potentielle muligheder for at reducerer rullemodstanden.

En vigtig pointe omkring reduktion af rullemodstand og dermed CO₂ reduktion er at se på de potentielle muligheder for at reducere rullemodstanden for et givent vejnet. For at belyse disse muligheder er der taget udgangspunkt i det danske statsvejnet som hvert år måles af Vejdirektoratet. Som vist i denne rapport er de væsentligste vejtekniske parametre for at opnå en reduktion af rullemodstanden vejenes tekstur og jævnhed. Derfor er der på baggrund af målinger på statsvejnettet i 2008 foretaget en analyse af niveauet af henholdsvis jævnhed, udtrykt ved IRI og tekstur udtrykt ved MPD samt hvordan fordelingen af disse er i henhold til den samlede længde af statsvejnettet.

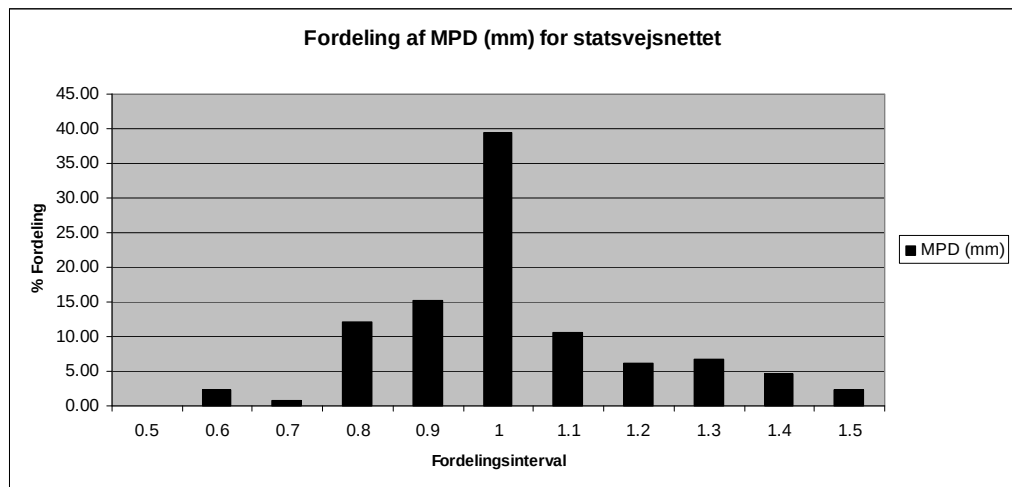
I figur 11 er vist fordelingen af IRI.



Figur 11 Fordeling af IRI (m/km) for statsvejnettet baseret på målinger i 2008

Som det ses af figur 11 ligger størsteparten af IRI tallene mellem 1 og 1.7 m/km. Det gennemsnitlige IRI tal for statsvejnettet i Danmark opgjort på baggrund af målinger udført i 2008 på 1.27 m/km. Jævnheden for det danske statsvejnet er der for ganske god.

I figur 12 er vist fordelingen af MPD



Figur 12 Fordeling af MPDI (mm) for statsvejnettet, baseret på målinger i 2008

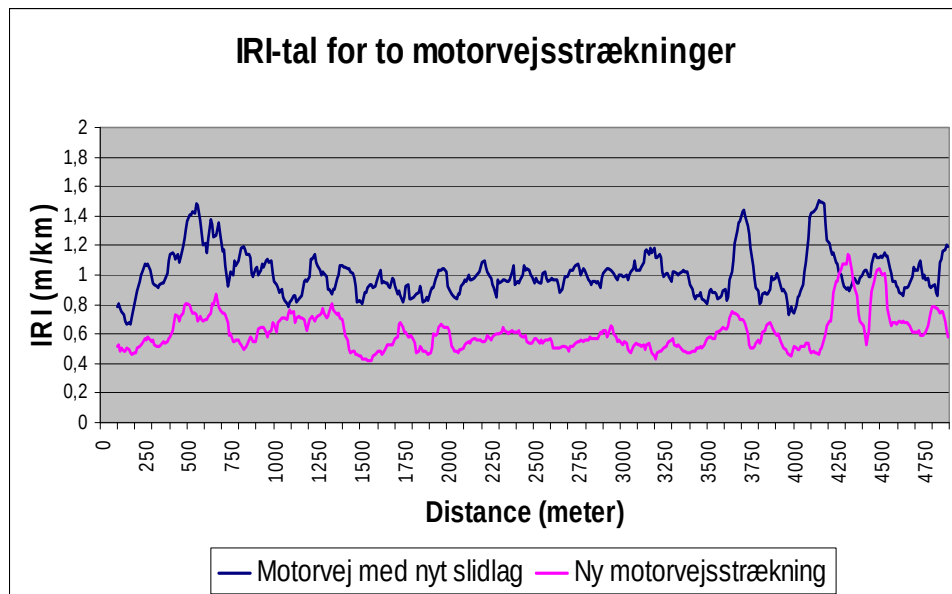
For MPD tallene for statsvejnettet er der en tydelig overvægt af strækninger med MPD tal på 1mm, hvilket også afspejles i det gennemsnitlige MPD tal på 0.99 mm.

Fastsættelse af optimale værdier for MPD og IRI.

Rullemodstanden er betinget af tekstur og jævnhedsforholdene MPD og IRI på vejene. Hvis der skal ske en reduktion af rullemodstanden og dermed spares brændstof og reducere CO₂ udslippet er det nødvendigt at se på hvordan man kan forbedre de vejtekniske parametre således at disse bidrager til at rullemodstanden mindskes.

Ser man på potentialet for at vejene har en bedre jævnhed og dermed mindste IRI tallet har tidligere analyser udført af Vejteknisk Institut (ref. 11) og som vist i figur 12, at der godt kan opnås et IRI tal som er mindre end 1, samt at det er muligt at bibeholde en god jævnhed i vejens levetid, dette er bl.a. udtrykt ved at den gennemsnitlige jævnhed på statsvejnettet i 2008 var 1.26 m/km.

Som grundlag for en analyse af potentiel reduktion af rullemodstanden benyttes et IRI tal på 0.9 m/km



Figur 11, Jævnheden på to motorvejsstrækninger som er henholdsvis nybygget og fået nyt slidlag.

Med hensyn til at optimere teksturen og dermed mindske MPD tallet er det væsentligt at tage højde for at teksturen også bidrager til friktionen og dermed trafikikkerheden, forstået på den måde at jo større tekstur jo bedre friktion og bremse evne, hvorimod rullemodstanden forbedres ved en mindskelse af teksturen.

Det skal endvidere pointeres at sammenhængen mellem tekstur og friktion ikke alene er betinget af MPD tallet som beskriver det der betegnes makrotekturen men også den finere del af teksturen, mikrotekturen, har en betydning for friktionen.

Vejteknisk Institut har tidligere udført analyser af hvorledes friktion og makro tekstur hænger sammen uden at det er lykkedes at finde en entydig sammenhæng. Analysen er beskrevet i (ref. 12).

Resultatet af analysen blev et kriterium for udpegning af vejstrækninger hvor vejbelægningen potentielt kunne være glat, på baggrund af MPD tallet. Kriteriet er vist i tabel 4.

Tabel 4. Kriterium for udvælgelse af strækninger som skal friktionsmåles .

	MPD-tal < 0.2 mm	MPD-tal < 0.25 mm	MPD-tal < 0.3 mm
Længde kriterium	>= 20 %	>= 25 %	>= 50 %

På baggrund af kriteriet angivet i tabel 4, samt erfaringer for vejbelægninger udført som støjreducerende belægninger er et MPD tal på 0.6 mm et godt grundlag for en analyse af potentialet i en reduktion af rullemodstanden ved at ændre MPD tallet.

For at kunne omregne fra IRI og MPD til rullemodstand er det nødvendigt at have en omsætningsformel. For IRI findes der ikke nogen reelle omsætningsformler, hvorfor resultatet fra ECRPD (ref. 3) benyttes, altså at en ændring i IRI tallet på en enhed giver en ændring i rullemodstanden på 6%, hvis kørsels-hastigheden er 90 km/t. På baggrund af dette og en sammenhæng mellem ændring i rullemodstand og brændstofforbrug på 10 % til 3 %, altså at brændstofforbruget ændres 3 % ved en ændring i rullemodstanden på 10 % (Tekniske Universitet i Gdansk, Polen), kan man beregne ændringen i brændstofforbruget, hvis man har kendskab til de enkelte vejstrækningers længde, trafikmængde, gennemsnitlig brændstofforbrug og IRI.

For MPD tallet sammenhæng med rullemodstanden er der lavet forskellige undersøgelser bl.a. Dr. Ulf Sandberg fra VTI i Sverige som har givet følgende sammenhæng mellem rullemodstand og MPD:

$$\text{Rullemodstand} = 0,0024 * \text{MPD} + 0.0083$$

Benyttes denne sammenhæng kan man på baggrund af målte MPD tal beregne den rullemodstand som stammer fra belægningernes tekstur.

Ud fra kendskabet til vejbelægningernes tilstand (jævnhed og tekstur) samt omsætningen fra tilstand til rullemodstand og deraf beregning af brændstofforbrug, er det muligt at foretage en samfundsøkonomisk analyse af værdien af at introducerer vejbelægninger med lav rullemodstand. En sådan analyse er foretaget i reference 13.

Konklusion

Gennemgangen af litteraturen viser, at måling af brændstofforbrug og rullemodstand er en kompliceret opgave og at resultaterne ofte kan være væsentligt forskellige. Parametre som jævnhed og tekstur er en væsentlig bidragsyder, når der tales om energiforbrug og rullemodstand. Derfor er det vigtigt at vejbelægningerne kan opretholde en god jævnhed i hele deres levetid. Ligeledes at der ved eventuelle vedligeholdelsestiltag sikres en jævn vejoverflade. Der kan stilles spørgsmålstegn ved om IRI er en passende parameter som mål for jævnheden, når vi ser på sammenhængen mellem jævnhed og rullemodstand. Som angivet i figur 1 og Descornet (ref.1) så er det de kortere bølgelængder som har en indflydelse på rullemodstanden disse bølgelængder er mindre repræsenteret i et IRI tal.

For flere af de forsøg som er afrapporteret i litteraturen har man relateret brændstofforbruget til IRI og desværre ikke taget belægningernes tekstur med i analyserne. Dette til trods for, at der fra den dækteknisk side angives at teksturen er en væsentlig bidragsyder for den rullemodstand der optræder i rullende dæk.

Derfor anbefales det, at parameteren tekstur, bliver en væsentlig faktor, når man skal optimere for rullemodstand, dog med hensyn til, at teksturen har stor betydning for trafiksikkerheden, gennem sin indvirkning på friktionen.

Undersøgelserne af bæreevnens indflydelse på rullemodstanden og energitabet viser at den del af rullemodstanden der skyldes deformationen af vejbefæstelsen maksimalt beløber sig til nogle få procent af den samlede modstand, for befæstelser der er undersøgt i forsøget. For svagere vejbefæstelser ville tabet fra deformationen formentlig kunne udgøre 20% eller mere af den samlede rullemodstand for tunge belastninger.

Referencer

1. Guy Descornet, Road Surface Influence on Tire Rolling Resistance, Surface Characteristics of Roadways, International Research and Technologies, ASTM STP 1031.
2. Antti Leinonen, Tyre Rolling Resistance on Road, Helsinki University of Technology, Espoo 2005.
3. Ulf Hammarström et al., ECRPD, Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation, Road surface effects on rolling resistance – coast down measurements with uncertainty analysis in focus. VTI 2008.
4. Dave Amos et al. Pavement smoothness and Fuel Efficiency, Analysis of Economic dimensions of the Missouri smooth Road Initiatives.
5. J. Epps et al. Westrack – The Road to Performance Related Specifications. International Conference on accelerated Pavement testing, October 1999.
6. Ulf Sandberg, Influence of Road Surface Texture on Traffic Characteristics Related to Environment, Economy and safety, VTI notat 53A-1997.
7. Hans Bendtsen ”Rolling resistance, fuel consumption – a literature review”, Danish Road Institute, Technical note 23, 2004
8. Unpublished report from California Department of Transportation, 2008.
9. G.W. Taylor et al. Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption – Phase III, Center for Surface Transportation Technologies, NRC Canada.
10. Per Jonsson et al. Mätning av bränsselförbrukning på asfalt - och betonbeläggning nor om Uppsala, VTI notat 31 – 2008.
11. Bjarne Schmidt et al. ”Viden om veje i drift” Vejteknisk Institut rapport 128

12. Bjarne Schmidt og Birger Roland Jensen "Friktion og MPD tal" Vejteknisk Institut, Eksternt notat 33
13. Connie Nielsen, Trine de Fine Skibsted "Den Energibesparende Vej Samfundsøkonomisk rapport, Forbedret samfundsøkonomi ved reduktion af rullemodstand.