

# Minskad energiförbrukning och högre hastigheter



**KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering**

**Piotr Lukaszewicz**  
Avd Spårfordon  
Inst för Farkost & Flyg  
KTH

## Vad orsakas energiförbrukningen huvudsakligen av, när man kör tåg?

1. **Gångmotstånd** = Bromsande krafter som motsätter sig tågets rörelse (svarar för ca 50 - 65 % av förbrukningen)

**Förbrukning 1**  $\longleftrightarrow$  gångmotstånd x körsträcka = traktionseffekt  $P_1$  x körtid

- Rullmotstånd
- Luftmotstånd
- Stigningar
- Accelerationsmotstånd

2. **Utnyttjad effekt,  $P_2$ , för hjälpkraft, komfort, värme** (5 - 20 %, säsonsberoende)

**Förbrukning 2**  $\longleftrightarrow$  utnyttjad effekt  $P_2$  x körtid

3. **Förluster** (30-35 % vid eldift)

(Dvs, **verkningsgraden** är idag 65 - 70% )

- Internt i fordonen (ca 15 - 20 %)
- Vid överföring av energi; kraftverk- elnät- omformning - fordon (ca 14 %).

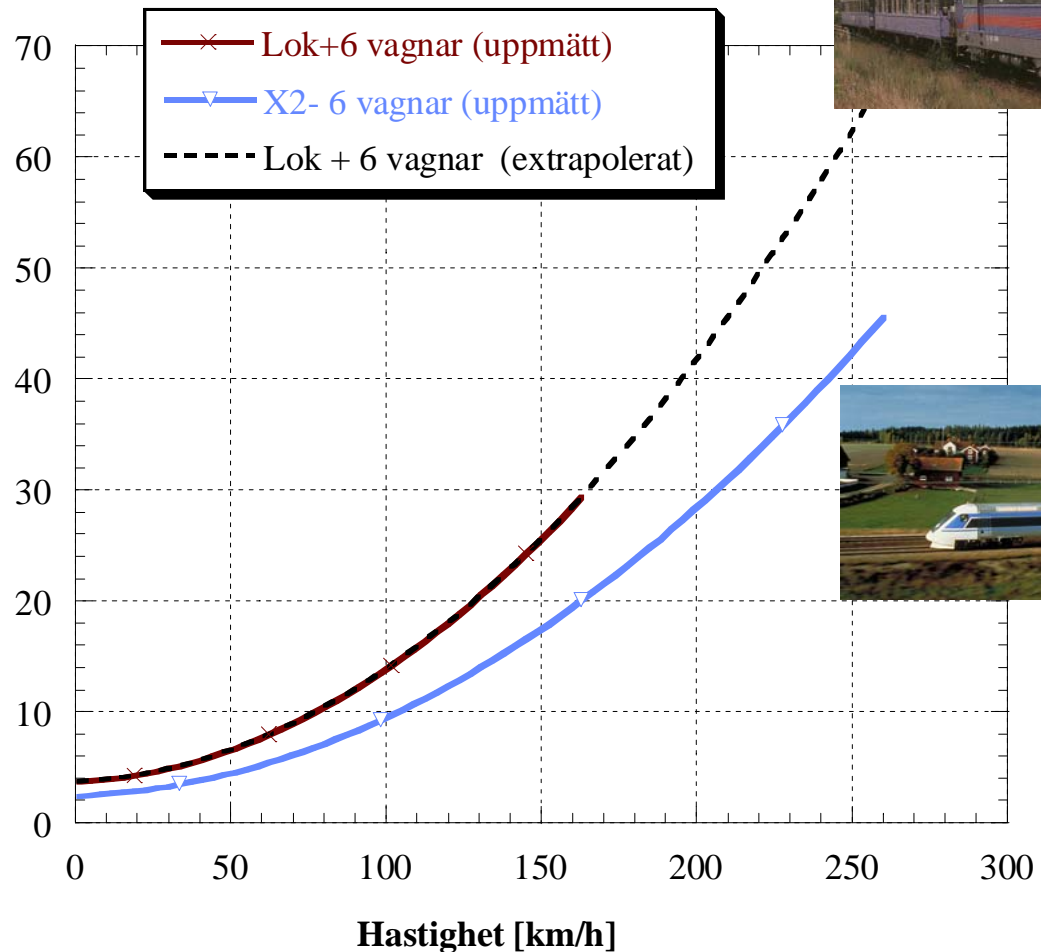
# Gångmotstånd

Luftmotståndet ökar approximativt kvadratisk med hastigheten och är dominerande i högre hastigheter.

Varierar med tågets aerodynamiska utformning.

Approximativt linjärt med tågets längd, bredd och höjd.

Gångmotstånd  
[kN]



Figuren visar rull + luftmotstånd på horisontellt rakspår.

# Tåg rullar lätt !!



**KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering**



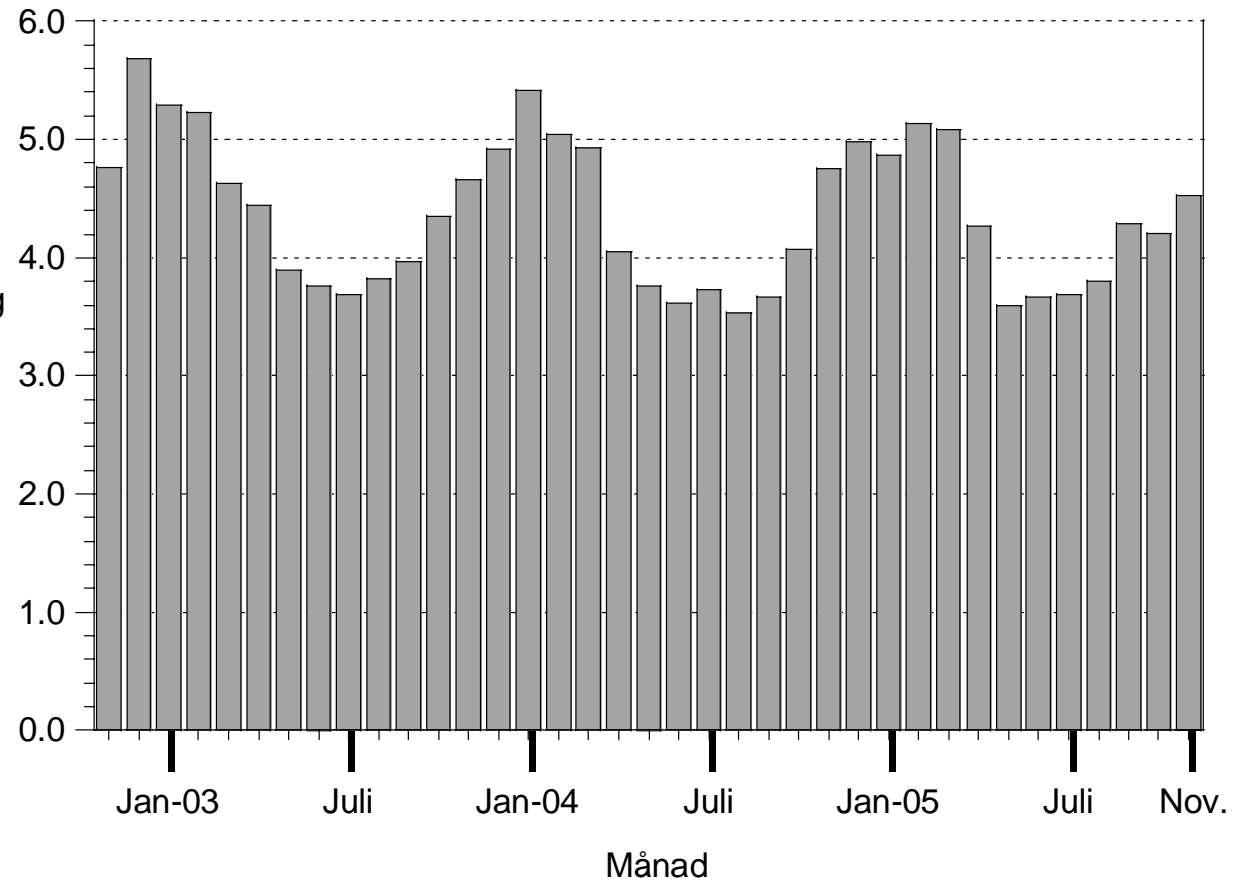
297,1 t  
2,8 m

# Hjälpkraft, komfort



KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering

Energi förbrukning  
(kWh/tåg-km)



**Exempel på energiförbrukningens variation till följd av klimatet för Regina. Förbrukningen är uppmätt vid strömavtagaren och inkluderar även stationär tågvarme.**



Källa: Andersson E., Lukaszewicz P., Energy consumption and related air pollution for Scandinavian electric passenger trains. TRITA-AVE 2006:46 ISSN 1650-7660 . KTH Stockholm 2006.

## Samband energi - ekonomi



KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering

- Miljöargument. Attraktivitet ger fler resenärer och högre beläggning.
- Lägre slitage och underhållskostnad om man bromsar med motorerna (återmatande broms).
- Optimalt utrymmesutnyttjande.
- Systemeffekter för energiförsörjning och kapacitet.
- Lägre energikostnader och miljöskatter, naturligtvis.

## Energiförbrukningen kan uttryckas per



KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering

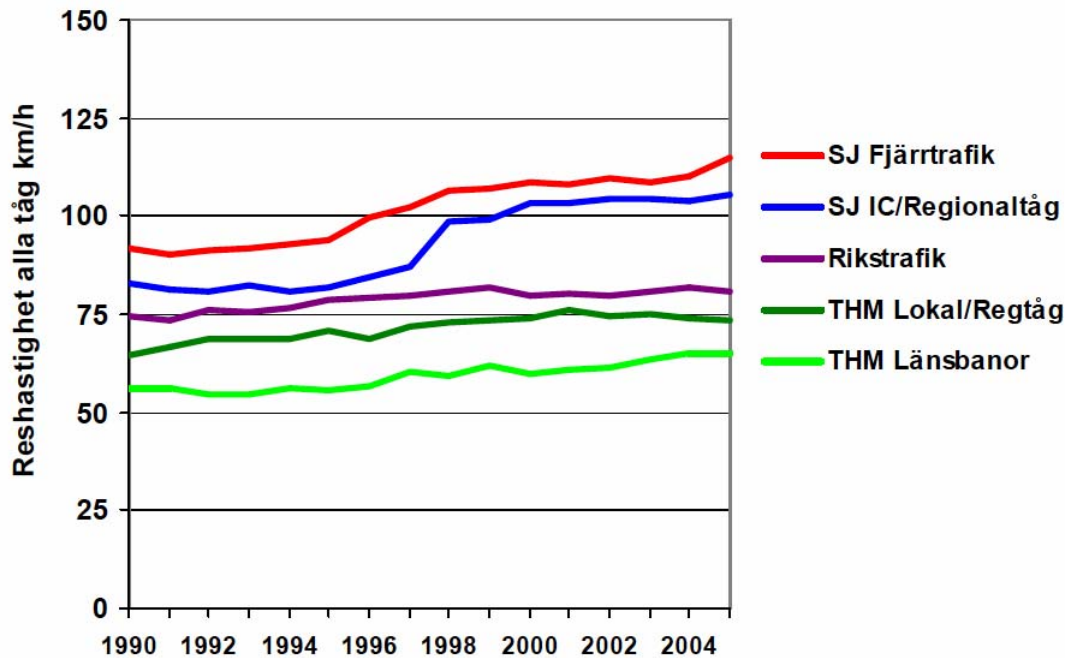
- Tågkilometer
- Sittplatskilometer
- Bruttotonkilometer
- Nettotonkilometer (godslast)
- Passagerarkilometer

Om energiförbrukningen uttrycks per passagerarkilometer så lägger man även in betydelsen av att tågtransporterna ska vara attraktiva så att man väljer att åka tåg!

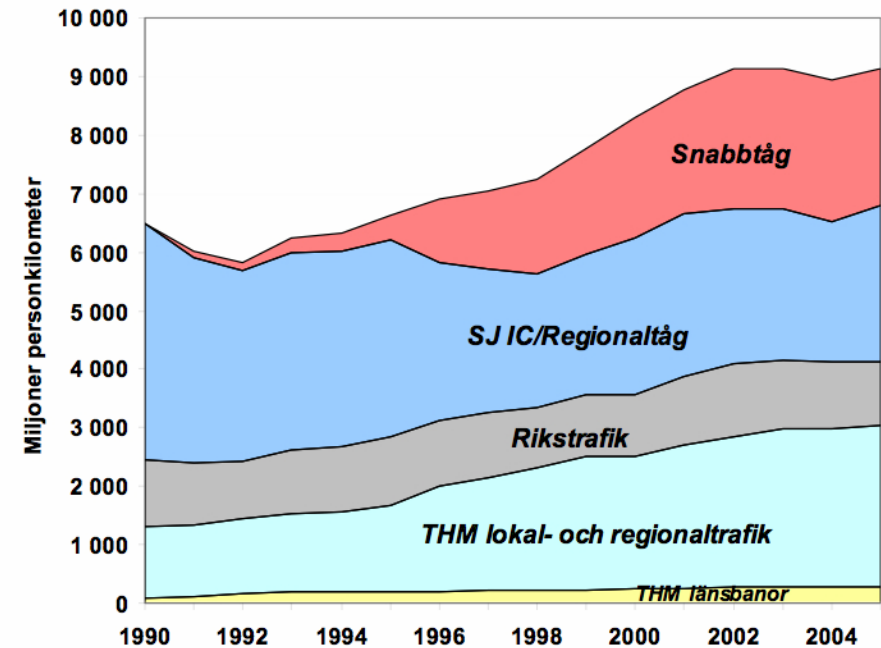
Dvs, det är inte enbart tågtilverkaren som påverkar förbrukningen per personkilometer. Man vill ha en hög belägningsgrad.

## Hur utvecklas tågtrafiken?

**Reshastighet olika trafiksystem**



**Utveckling av olika trafiksystem**



Källa: Nelldal B.L., Troche G., Utveckling av utbud och priser på järnvägslinjer i Sverige 1990-2005. ISSN 1653-4484. KTH Stockholm 2006.

## Varför ökar inte energiförbrukningen per passagerarkilometer när reshastigheten ökar?



**KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering**

1. Modernare tåg ersätter äldre tåg successivt.
2. Fler passagerare – högre beläggingsgrad.

## Energiförbrukning Stockholm – Göteborg, 456 km

	1994 <i>Lok + 8 v</i>	1994 <i>X 2000</i>	2004 <i>X 2000</i>
Restid	4h 25m	3h 10 min	3h 5 min
Stopp vagnar	10 8	2 5	4 6
Beläggning (%)	44	44	55
Förbr per sittplats - km (Wh)	47	46	42
Förbr per pass –km (Wh)	<b>108</b>	<b>106</b>	<b>77</b>



Källa: Andersson E., Lukaszewicz P., Energy consumption and related air pollution for Scandinavian electric passenger trains. TRITA-AVE 2006:46 ISSN 1650-7660 . KTH Stockholm 2006.

## Energiförbrukning Stockholm - Västerås

	1994	2004
Restid	1h 18 min	53 min
Stopp	2	3
Konfig	lok + 4	0 + 3
Beläggning (%)	35	35
Förbr per sittplats-km (Wh)	42	30
Förbr per pass-km (Wh)	<b>120</b>	<b>87</b>



## Moderna tåg är energisnålare än sina föregångare



KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering

- **Bättre aerodynamisk utformning, generellt.**
- **Lägre gångmotstånd per sittplats.**  
Breda vagnskorgar kan tex ge högre luftmotstånd relativt smalare vagnar men möjliggör ett bättre utrymmes utnyttjande och fler sittplatser istället.
- **Återmatande broms (12 – 17 % återmatas idag).**
- **Högre total verkningsgrad.**

**Dessutom lägre energiförluster i järnvägens elsystem.**

## Är det möjligt att fortsätta trenden?

I projektet **GrönaTåget**  
har en studie gjorts:



KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering

**Framtida körtider och energiförbrukning  
på Västra Stambanan  
samt  
Ostlänken - Götalandsbanan**

## Den framtida energiförbrukningen för Gröna Tåget har beräknats m h a simuleringar i ERTSim

### ERTSim:

(Energy and Running Time Simulator)



KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering



- Är ett simuleringsverktyg för att beräkna tågs körtider och energiförbrukning.
- ERTSim har visat sig ha god precision för beräkningar av tågs energiförbrukning. Verktuget är verifierat mot mätningar.
- Flexibelt. Programmerat i beräkningsprogrammet MATLAB som är "de facto" industristandard.
- Kan hantera valfria tågmodeller, förarbeteenden och körstilar. Eco driving kan studeras.
- "Testbänk". Lämpligt för tex variabelanalys.

## Det är möjligt att få mycket god överensstämmelse mellan modell och verklighet

### Jämförelse: simuleringar – verklighet Exempel Godståg 1197 ton (svårt fall)

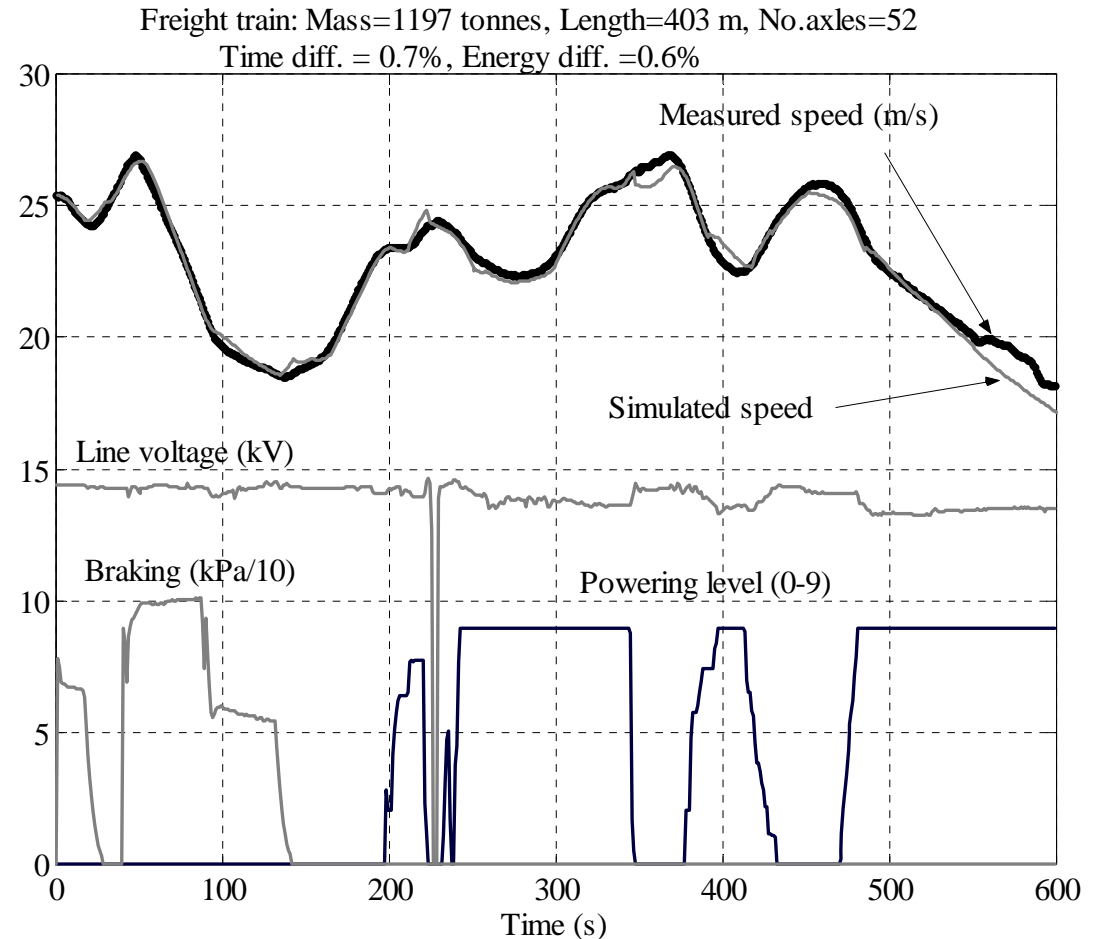
Simuleringen visar en nästan identisk hastighetsprofil mot den uppmätta.

Den verkliga förarens pådrag och bromssignaler har använts som invariabler. Samma initiavillkor i början av simuleringen som för det verkliga tåget.

Energiförbrukningen skiljer sig med 0,6%.  
Körtidsskillnaden är 0,7%.

Följande modeller finns:

- Godståg och
- Lokdragna persontåg (Rc)
- X12, X2, X50
- olika varianter av höghastighetståg



Källa: Lukaszewicz P.: Energy consumption and running time for Swedish freight trains  
ISSN 1103-470X. KTH Stockholm 2001.



**KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering**



### Således:

- Beroende av bra indata, som de flesta bättre system.
- **Håller man tungan rätt i mun så kommer man nära verkligheten.**

## Gångmotstånd för Gröna Tåget – antaganden:

6 vagnar men med olika aerodynamisk utformning.

Antal platser 465

Beläggning 55 - 60% (antaget)



KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering

GT 250:  $F_r = 2400 + 60v + 6,52v^2$  [N],  $v$  i m/s (något bättre än X2000)

GT VHST:  $F_r = 2500 + 80v + 4,53v^2$  (Bedöms som en möjlig undre gräns)

Utgångspunkt. Tyskt höghastighetståg ICE-3, 6 vagnar, beräknat.

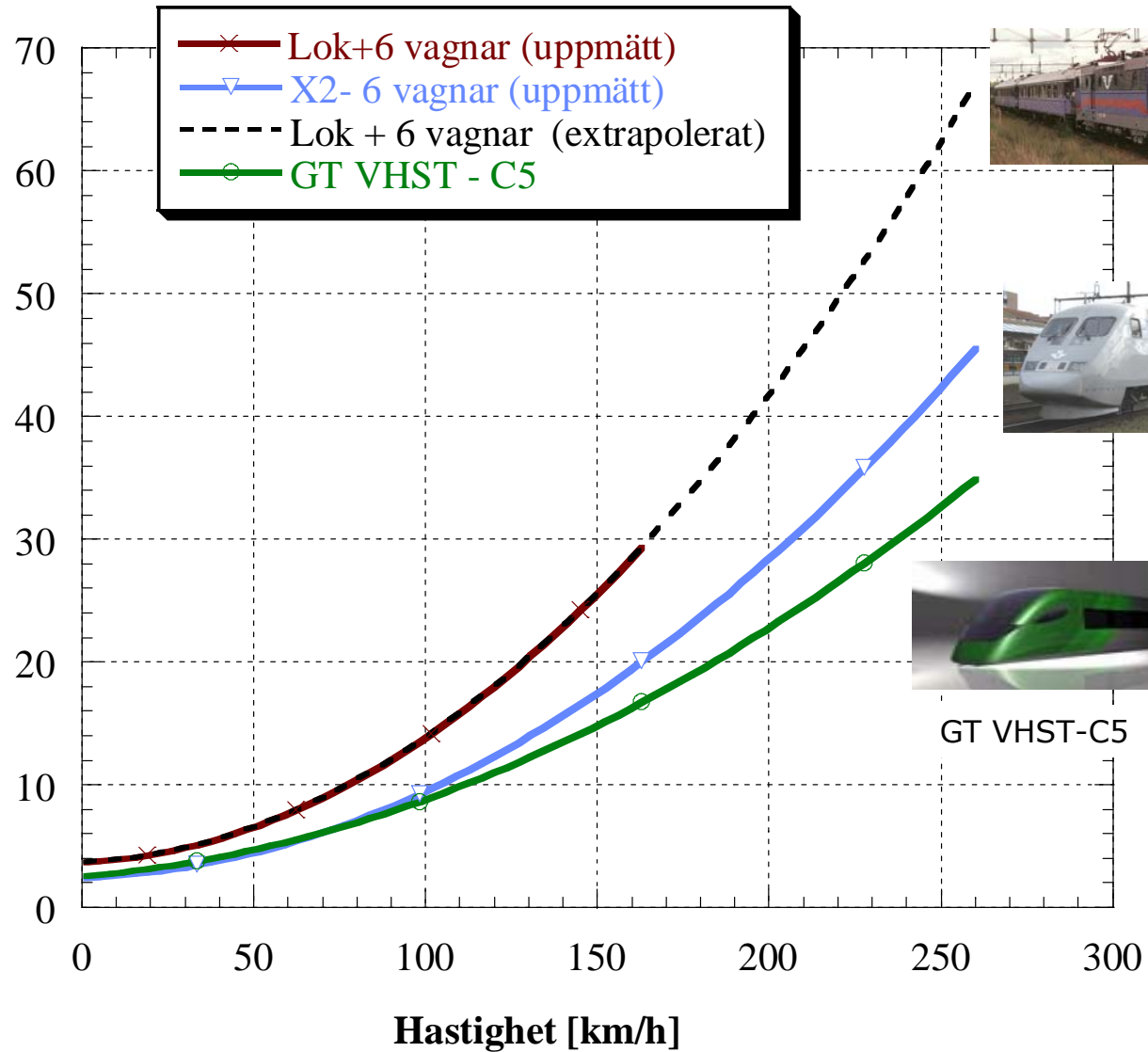
Följande komponentmotstånd har ändrats (Källa: Ben Diedrichs, KTH).

Bred korg	+10%
Front/akter	-20%
Boggier	-50%
Vagnsmellanrum	-70%

GT VHST-C5:  $F_r = 2500 + 80v + 5,0v^2$

(Bedöms som möjligt. Inklusive 10% marginal för luftmotståndet jmfrt med ovanstående GT VHST).

## Gångmotstånd [kN]



GT VHST-C5



KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering

## Gröna Tåget på Västra Stambanan

### Stockholm - Skövde - Göteborg

Tåg	Sträcka	STH <sup>1)</sup> [km/h]	Stopp	Belägn. [%]	Körtid [h:mm]	Återmatning [%]	Energi förbr. [Wh/pass-km]
<b>X2-6v</b>	VS	200	2	55	2:41	11	77.0
<b>GT-250</b>		250	2	55	2:24	22	52.0
<b>GT-250</b>		250	4	55	2:30	25	52.0
<b>GT-250</b>		250	4	<b>60</b>	2:30	25	<b>48.0</b>

1) STH: Största Tillåtna Hastighet

**GT-250 har ca 30 – 40 % lägre specifik energiförbrukning än X2-6v trots högre tillåten hastighet (50 km/h).**

Förbrukningen inkluderar förluster i elektriska banmantningen (kontaktledning, omformare).

Teoretisk körtid. Inga uppehåll är inlagda vid stopp.

För verklig tidtabell ska marginaler inkluderas 13 – 15 min, mm.

# Gröna Tåget på framtida Götalandsbanan

Stockholm - Jönköping - Göteborg

Tänkbara scenarion med GT VHST C5  
(möjligt gångmotstånd med viss marginal)



KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering

- Inga stopp
  - STH 250
  - STH 280
  - STH 320
- 9 stopp
  - STH 250
  - STH 280
  - STH 320

Vi har uppskattat att antalet resanden ökar så att den genomsnittliga beläggningen ökar från ca 55% till ca 60%.

## Energiförbrukning och körtid

**Två olika körstilar har testats på Götalandsbanan med GT VHST -C5.**

### 1. Referens (körning på kortast möjlig tid)

- Max pådrag vid start. Accelerationen får ej överstiga  $0,6 \text{ m/s}^2$ .
- Retardationen vid broms hålls konstant på  $0,6 \text{ m/s}^2$  (bruklig nivå).
- Blandbroms: Max elbroms och den mekaniska fyller ut resten.
- Hastigheten regleras mha farthållare så att STH följs.
- Frirullning används i mkt liten utsträckning.

### 2. Eco 1

- Som ovan men minimerad användning av den mekaniska bromsen.
- Lägre retardation vid bromsning.
- Mer återmatning.



**KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering**

Referens	Körtid [h:mm]	Energiförbrukning inkl förluster i kontaktledning och omformare			Återmatning %	Observera att förbrukningen per <u>pass-km</u> är uttryckt i <u>Wh</u> ej kWh
		[kWh/km]	[Wh/Pass-km]			
9 stopp						
320 km/h	2:09	17,1	<b>61,4</b>		31,1	
280 km/h	2:17	15,1	<b>54,2</b>		28,6	
250 km/h	2:23	13,2	<b>47,3</b>		23,9	
Inga stopp						
320 km/h	1:45	18,1	<b>64,7</b>		18,1	
280 km/h	1:56	15,3	<b>54,7</b>		16,0	
250 km/h	2:05	12,9	<b>46,3</b>		17,8	
<b>Eco 1</b>						
	[h:mm]	[kWh/km]	[Wh/Pass-km]	Återmatning [%]	Skillnad i förbrukning relativt referens [%]	
9 stopp						
320 km/h	2:08	14,8	<b>53,2</b>	40,1	13,4	
280 km/h	2:19	13,1	<b>46,8</b>	38,4	13,6	
250 km/h	2:26	11,6	<b>41,6</b>	39,3	12,0	
Inga stopp						
320 km/h	1:48	16,5	<b>59,3</b>	24,8	8,5	
280 km/h	1:58	14,3	<b>51,1</b>	22,5	6,5	
250 km/h	2:06	12,3	<b>44,1</b>	22,2	4,7	

# Slutsatser

- Trots högre hastigheter så är den specifika energiförbrukningen för moderna tåg 25-45% lägre.
- De viktigaste orsakerna till lägre förbrukning är
  - Bättre aerodynamisk utformning, generellt.
  - Mer återmatande broms (Regina: 12 – 17 % återmatas idag).
  - Lägre gångmotstånd per sittplats.  
Breda vagnskorgar/dubbeldäckare kan tex ge högre luftmotstånd relativt smalare vagnar men möjliggör ett bättre utrymmes utnyttjande och fler sittplatser istället.
  - Högre belägningsgrad.
  - Högre total verkningsgrad.



KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering

# Slutsatser



KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering

- På Västra Stambanan kan den specifika energiförbrukningen bli ca 30% lägre med GT-250 i STH 250 än med X2-6v i STH 200.
- Minimering av mekanisk broms kan sänka förbrukningen ytterliggare (upp till 20% jämfört med mintidskörning vid många stopp).
- Återmatningsgraden kan bli hög (15 – 40%). Höga krav bör ställas på bl a infrastrukturen så att energin kan tas om hand.
- Totala specifika **energiförbrukningen behöver inte öka** trots ökade hastigheter och minskade restider. Modernare fordon kan ersätta äldre fordon som har relativt sett sämre energiprestanda.
- Gröna tåget fortsätter trenden med lägre energiförbrukning och kortare restider!

# Slutsatser

- Framtida elproduktion med renare teknik ger lägre emissioner av luftföroreningar från tågtrafiken!



**KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering**

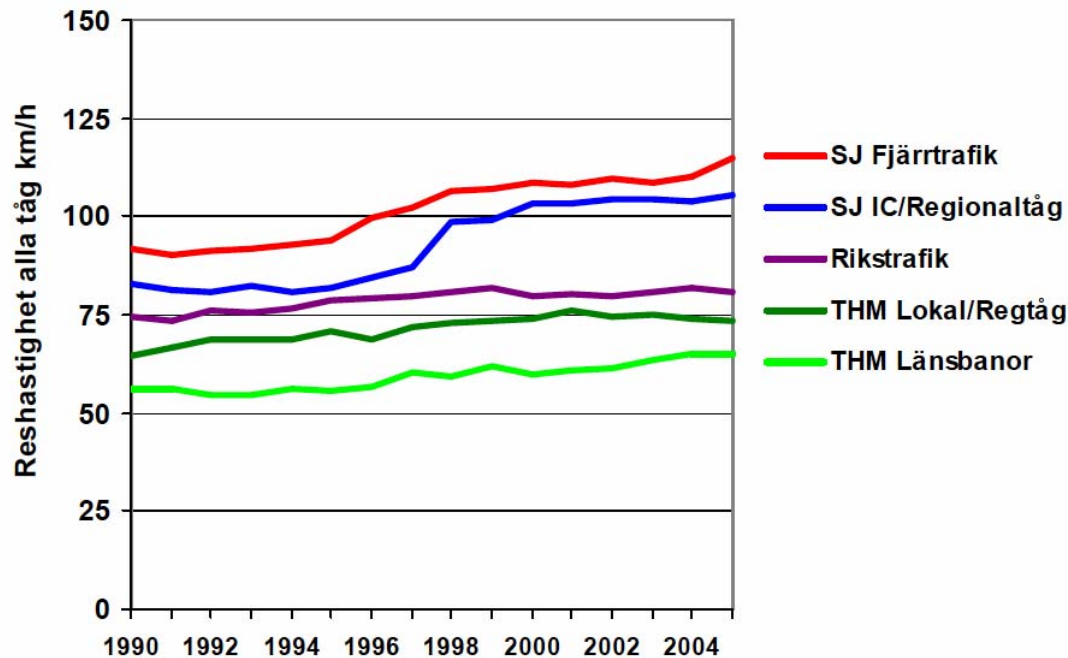
# För mer information om tågs energiförbrukning



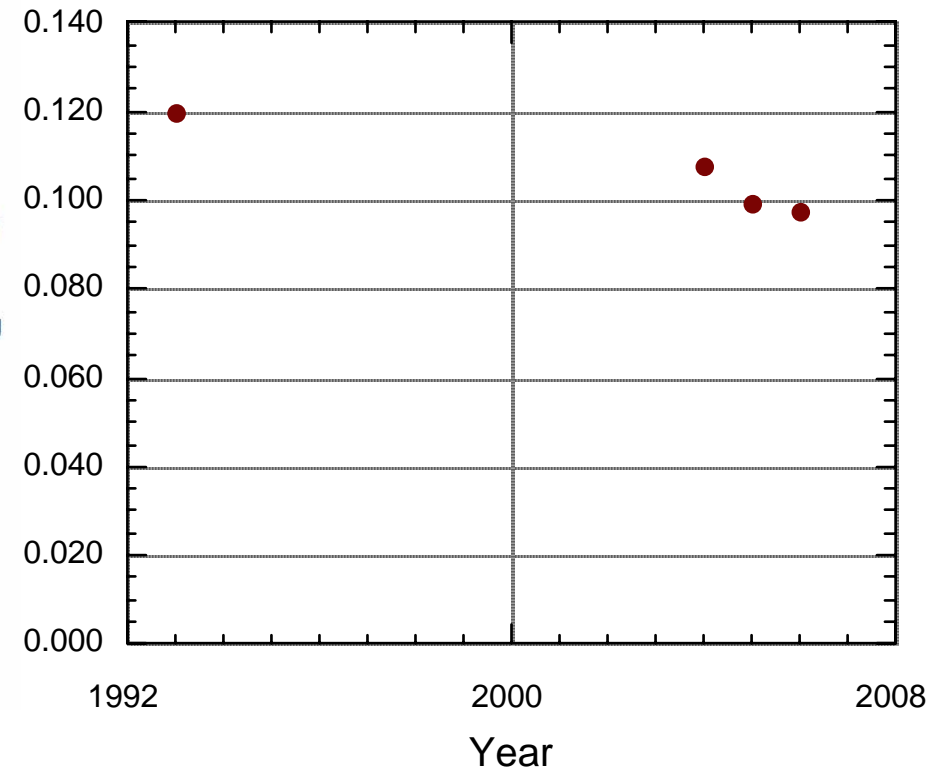
**KTH Aeronautical  
and Vehicle Engineering**

**Piotr Lukaszewicz**  
e-mail: [pilu@kth.se](mailto:pilu@kth.se)

### Reshastighet olika trafiksystem



### Specific consumption [kWh/p-km]



- Medelhastigheten har ökat i Sverige.  
130 á 160 km/h → 180 à 200 km/h (25 - 50 %)
- Restiderna har minskat 25 - 40%

**Den specifika energiförbrukningen har ej ökat.**

## Exempel på simulerad tåg hastighet som funktion av tid



KTH Aeronautical and Vehicle Engineering

Non stopp

STH 280 km/h (ca 78 m/s)

20kW/ton

