

Banestyrelsen

Simulering af miljøkonsekvenser ved togkørsel

Miljøchef Ulrik Winge
Banestyrelsen
Sølvgade 40
1349 København K

1. Resume

Miljøspørgsmålet får større og større vægt i den trafikpolitiske debat, og jernbanen spiller en fremtrædende rolle når det gælder miljømæssigt mere bæredygtig transport. Men også togenes energiforbrug og luftforurening pr transporteret enhed kan nedbringes. Det kan ske bl.a. ved at påvirke den måde togene kører på.

Imidlertid har der hidtil ikke eksisteret generelle værktøjer, der har kunnet belyse konsekvenserne af ændrede køremønstre, infrastruktur og materielanvendelse. Derfor har Banestyrelsen og DSB udviklet et simuleringsværktøj, der gør det muligt at beregne energiforbrug og luftforurening fra tog i forskellige driftssituationer.

Værktøjet er udviklet som støtteværktøj for ingeniører og øvrige relevante fagfolk.

Første udgave af værktøjet er nu stort set færdigudviklet, dog mangler endnu en afsluttende verifikation af beregningernes rigtighed.

Med værktøjet er det muligt at simulere miljøeffekten ved ændringer af materielanvendelse, infrastruktur, køreplaner, standsemønstre og kørestrategier.

Værktøjet planlægges efterfølgende udbygget med relevante litra (togtyper) der anvendes ved togtransport i Danmark, og vil blive anvendt i forbindelse med større projekter, til undervisningsformål samt til at beregne generelle sammenhænge mellem energiforbrug/emissioner og togstørrelse, trækraft, køreplan mv.

Nøgleord: Tog, jernbane, energiforbrug, luftemissioner, simuleringsmodel

2. Introduktion

Bliver jernbanen udnyttet rigtigt har den en række miljømæssige fordele i forhold til andre transportmidler, og kan dermed yde et væsentligt bidrag til at løse et af transportsektorens største problemer: den stadigt stigende miljøbelastning. Især står togtransporten miljømæssigt stærkt der hvor mange mennesker eller store mængder gods skal flyttes på en gang, f.eks. ved hurtig persontransport mellem landsdelene, i de større byers myldretidstrafik og ved transport af store mængder gods over lange afstande.

Banestyrelsen

Men heller ikke togtransport er forureningsfri. Energiforbruget til togdrift er baseret på fossile brændsler - enten direkte i dieselmotorerne eller indirekte gennem elproduktionen. Og den dertil hørende luftforurening med kuldioxid (CO₂), kvælstofoxider (NO_x), svovldioxid (SO₂), kulbrinter (HC) samt støv og partikler bidrager hver især til miljøproblemer som drivhuseffekt, forsuring, smog osv.

Derfor har DSB og Banestyrelsen (dannet pr. 1.1.1997 ved opdeling af DSB) i en årrække arbejdet på at reducere luftforurening og energiforbrug fra togdriften. Det kan bl.a. ske ved at tilrettelægge den måde togene køres på, dvs. hastigheder, accelerationer, standsemønstre osv. Det er forhold som både lokomotivførere, køreplanlæggere og trafikstyringspersonale har indflydelse på.

Sammenhængene mellem energiforbrug/luftforurening og faktorer som køremåder, infrastruktur, trækraftlitra og togstørrelse er imidlertid ganske komplicerede. De gængse data rummer ikke mulighed for tilstrækkeligt præcist at lave opgørelser af konsekvenserne af ændrede køremåder som følge af ændringer i f.eks. fremføringsteknik, infrastruktur, trafikafvikling, køreplaner eller materiel. Da man i sagens natur ikke kan udføre målinger hver eneste gang man ønsker en eller anden sammenhæng belyst, blev der i 1995 igangsat et udviklingsprojekt med det formål at videreudvikle en allerede eksisterende model for IC3, til et mere generelt og omfattende værktøj, hvormed detaljerede og konkrete beregninger af togenes energiforbrug og luftforurening kan gennemføres.

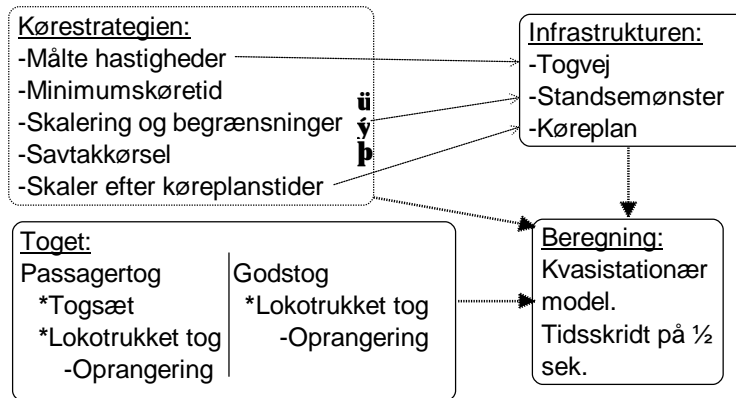
Forinden var energiforbrug og luftforurening fra alt DSBs dieselmateriel blevet målt i samarbejde med Dansk Teknologisk Institut, der også har medvirket ved udviklingen af simuleringsværktøjet.

3. Opbygning af den samlede model

De situationer der skal kunne konsekvensberegnes vil være yderst forskellige. Derfor er der i "simuleringsværktøjet" indlagt mulighed for at variere på en lang række parametre. Overordnet set er der tale om tre grupper:

- Infrastrukturen
- Toget
- Kørestrategien

Banestyrelsen



Infrastrukturen omfatter oplysninger om kurver, gradienter (stigninger og fald), tilladte hastigheder og placering af stationer og signaler.

Der kan i værktøjet defineres ny og ændres på eksisterende infrastruktur. På basis af oplysninger om infrastrukturen sammensættes der *togveje*, som er en fastlæggelse af på hvilke strækninger der skal køres. På togvejen vil være beliggende et vist antal stationer. *Standsemønstret* fastlægger ved hvilke stationer der skal standses. *Køreplanen* fastlægger endeligt hvad køretiden skal være mellem de enkelte stationer, samt hvor længe toget skal opholde sig ved de stationer der standses ved.

Togveje, standsemønstre og køreplaner kan defineres i værktøjet.

Toget kan enten være et *passagertog* eller et *godstog*. Passagertog er enten lokotrukne eller består af togsæt, mens godstog altid er lokotrukne. Ved beregning af togsæt er det tilstrækkeligt at specificere antal sæt i toget, hvorimod det for de lokotrukne tog er nødvendigt at specificere togets oprangering (dvs. vogntype og antal vogne). Passager- og godsvogne kan defineres, hvilket giver mulighed for at fastlægge en eller flere standardtogvogne. Værktøjet vil i sin første udgave rumme DSBs trækraftlitra IC3 (dieseltogsæt), MZIV (diesellokomotiv) og ER (eltogsæt).

Kørestrategien kan betragtes som en virtuel lokomotivfører, som bestemmer efter hvilke regler toget skal fremføres. Kørestrategien skal sikre at der opnås en så realistisk simulering som muligt, hvorfor der er knyttet et antal parametre til de forskellige kørestrategier. Der kan vælges mellem i alt fem strategier.

En mulighed er at vælge en kørestrategi der medfører at der opnås nøjagtigt de samme hastigheder i simuleringen på de samme steder som en konkret målt kørsel. For at dette kan lade sig gøre, er det nødvendigt at der foreligger data for hvor hurtigt toget har kørt (dvs. sammenhørende målte værdier for tid, sted og hastighed - sådanne data kan relativt let indsamles, f.eks. ved hjælp af GPS udstyr). Herudover skal der specificeres en togvej. Det er ikke nødvendigt at specificere køreplanstider

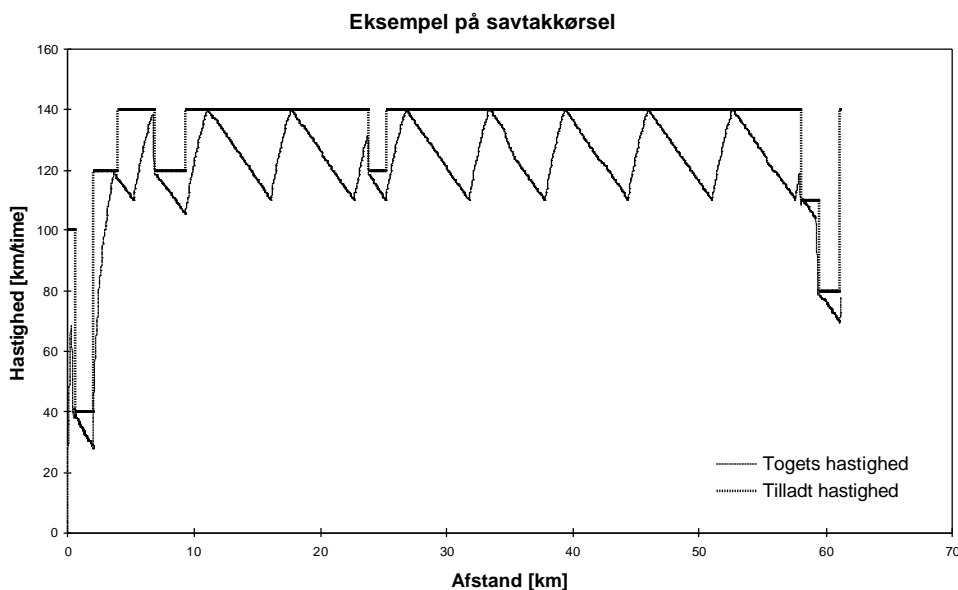
Banestyrelsen

eller standsninger, idet disse er indeholdt i måleværdierne for tid, sted og hastighed.

En anden mulighed er at vælge en kørestrategi der giver den kortest mulige køretid (minimumskøretiden). Dette opnås ved at "der" på hele strækningen kører så hurtigt som muligt, under overholdelse af de til ethvert sted gældende hastighedsbegrænsninger. Grundlaget for denne kørestrategi er en togvej og et standsemønster.

For disse to kørestrategier kan der ikke justeres parametre. I den tredje kørestrategi der er til rådighed er der til gengæld knyttet en række parametre.

For det første kan der her angives en hastighedsdifferens som hastigheden tillades at variere indenfor (undtagen ved standsninger). Funktionen er her at når der efter en acceleration opnås en vis hastighed, udkobles trækraften, hvorefter toget ruller indtil forskellen mellem den aktuelle hastighed og den hastighed toget havde da trækraften blev udkoblet, svarer til den angivne hastighedsdifferens. Herefter påbegyndes en ny acceleration, og så fremdeles. Denne køremåde kaldes *savtakkørsel* efter formen på den kurve der viser hastigheden som funktion af stedet (se eksempel herunder). Køremåden er specielt relevant for de litra der ikke har cruisekontrol, og er en meget almindelig fremføringsteknik.



For det andet kan der angives en overordnet hastighed som ikke må overskrides, dvs. tilladte hastigheder *afskæres*. For det tredje kan der angives en *skaleringsfaktor* for de tilladte hastigheder, således at disse kan skaleres op eller ned til et andet niveau. Det kan endvidere angives om der skal skaleres *før* der afskæres eller omvendt. Herudover er det muligt at angive hvor kraftigt der må accelereres og bremses. For at kunne anvende denne kørestrategi, skal der anføres en togvej og et standsemønster.

Banestyrelsen

Den fjerde mulighed er at vælge en kørestrategi der giver minimumskøretiden ved *savtakkørsel*. Den eneste parameter der kan indstilles her er den hastighedsdifferens som hastigheden må variere indenfor (undtaget ved standsninger).

Den femte mulighed er at vælge en kørestrategi som tilpasser køretiderne til en køreplan. Denne kørestrategi indeholder samme parametre som beskrevet ovenfor. Tilpasningen af køretiden til køreplanen kan ske ved enten at skalere accelerationerne eller at skalere hvor hurtigt der køres. Da skaleringen ikke er givet på forhånd, findes skaleringsfaktoren iterativt mellem hvert stop. Denne kørestrategi kræver oplysning om en togvej, et standsemønster og en køreplan.

4. Togmodeller

Hver litra er beskrevet ved hjælp af en matematisk model.

Hver model indeholder ligninger til beregning af energiomsætningen i det konkrete litra, samt beregning af de til energiforbruget hørende luftemissioner. For dieseltogene er de generelle sammenhænge mellem energiforbrug og luftemissioner fundet ved måling. Disse målinger blev gennemført i 1994 for det daværende DSB af Dansk Teknologisk Institut.

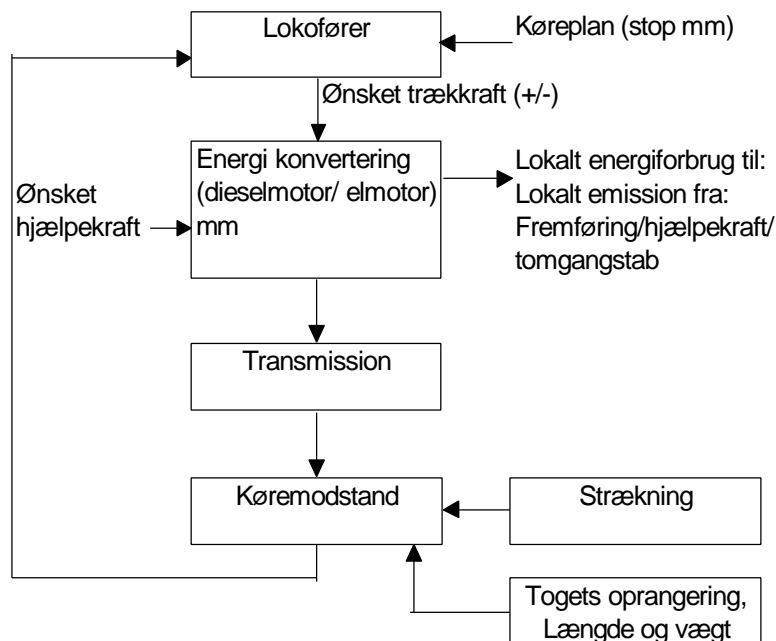
For eltog er bruttoenergiforbruget og emissionerne forårsaget af elforbruget afhængigt af hvorledes elektriciteten produceres, og der er endvidere forskellige *metoder* til beregning af bruttoenergiforbrug og emissioner pr kWh forbrugt elektricitet. For at imødekomme denne problemstilling, er der mulighed for at indlægge nøgletal for forskellige betragtningsmåder i værktøjet.

Alle modellerne er opbygget som kvasistationære modeller, dvs. at alle variable holdes konstant i hvert tidsskridt, som er fastlagt til $\frac{1}{2}$ sekund.

Beregningen i det enkelte tidsskridt er for IC3-modellen anskueliggjort i nedenstående figur. Udgangspunktet er køreplanen, hvorudfra den virtuelle lokomotivfører fastlægger om den aktuelle trækraft skal forøges eller reduceres. Ønsket om forøget trækraft behandles i et energikonverteringsmodul, under hensyntagen til krav om hjælpekraft (lys, ventilation mv.). Resultatet af energikonverteringen behandles i et transmissionsmodul, hvorefter togets hastighed og acceleration beregnes i et køremodstandsmodul, under hensyntagen til strækningsdata (gradienter, kurver mm.) samt togets oprangering og vægt. Oplysningerne om hastighed, acceleration mv. føres tilbage til lokoførermodulet, og næste tidsskridt er klar til beregning.

Banestyrelsen

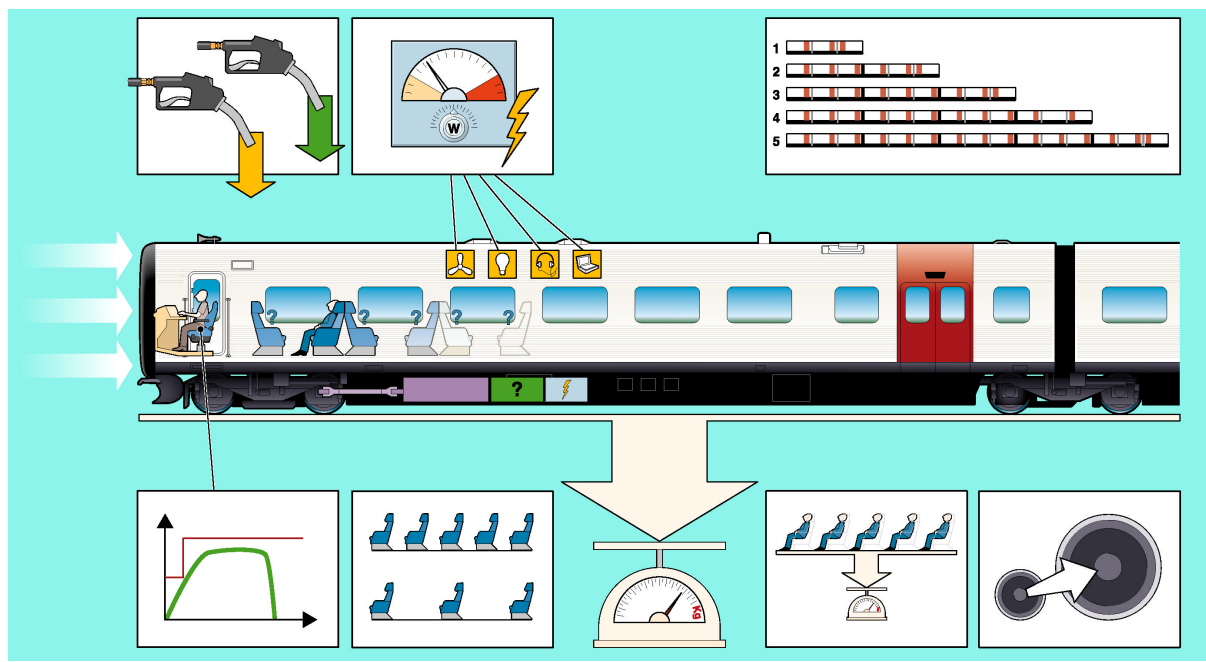
Ønsket rejsetid
Ønsket kørestrategi
(acc/bremsning/max. hast. m)
Aktuel hastighed



De parametre der kan varieres i simuleringværktøjet, afhænger af det enkelte litras opbygning og funktion.

De grundlæggende parametre for toget omfatter togets vægt samt antal pladser i toget. Herudover kan den gennemsnitlige vægt af en passager, hjuldiameteren, modvind og antal motorer i drift specificeres, ligesom det kan anføres hvor stor en hjælpeeffekt til lys, klimatisering mv. motorerne skal levere. Endvidere kan der for IC3's vedkommende vælges mellem to forskellige typer brændstof. For det ene brændstofs vedkommende kan der herudover vælges mellem motorer med og uden katalysator.

Banestyrelsen



De grundlæggende parametre for toget.

5. Beregningsresultater

Resultatet af en simulering er togets samlede energiforbrug og luftemissioner samt køretiden. For dieseltog beregnes dieselforbruget samt emissionerne CO_2 , SO_2 , NO_x , HC, CO, CH_4 og partikler. For eltog beregnes den forbrugte og den eventuelt regenererede elmængde samt bruttoenergiforbruget og emissionerne CO_2 , SO_2 , NO_x , HC, CO og støv.

Energiforbruget og luftemissionerne beregnes både som totalmængder og normeret med kørslen, dvs. pr. plads- eller bruttonkm samt pr. person eller godstonkm.

Endvidere er der mulighed for at eksportere dels slutresultatet af beregningerne dels resultaterne for de enkelte tidsskridt til regneark. Resultaterne for hvert tidsskridt vil ud over energiforbruget og emissionerne inkludere diverse motorparametre. Da antallet af tidsskridt kan være relativt stort, kan der fastlægges kriterier for togets acceleration og hastighed, der skal være opfyldt for at resultaterne for det enkelte tidsskridt medtages ved eksporten.

Som beregningseksempler er der på strækningen København-Odense (afstand 161 km) gennemført simuleringer for tre sammenkoblede IC3 togsæt:

1. IC-tog, maks. 140 km/t med stop ved alle IC-stationer
2. Minimumskøretid for IC-tog, maks. 140 km/t med stop ved alle IC-stationer, svarende til f.eks. et forsinket tog
3. Lyntog, maks. 140 km/t uden stop
4. Lyntog, maks. 180 km/t uden stop

Banestyrelsen

Resultatet af simuleringerne er anført i nedenstående skema. Resultaterne skal dog tages med forbehold, da modellerne endnu ikke er verificeret (se senere).

	IC-tog (køre- plans- bestemt)	Minimums- køretid for IC-tog	Lyntog (køre- plans- bestemt)	Lyntog (køre- plans- bestemt)
Størst til- ladte ha- stighed	140 km/h	140 km/h	140 km/h	180 km/h
Køretid	01:37:00	01:20:28	01:20:00	01:11:00
Totalt energifor- brug	18.057 MJ	21.883 MJ	17.729 MJ	20.921 MJ
Energifor- brug	0,26 MJ/plkm	0,31 MJ/plkm	0,25 MJ/plkm	0,30 MJ/plkm
CO ₂	18,2 g/plkm	22,0 g/plkm	17,9 g/plkm	21,1 g/plkm
SO ₂	0,0043 g/plkm	0,0052 g/plkm	0,0042 g/plkm	0,0050 g/plkm
NO _x	0,28 g/plkm	0,35 g/plkm	0,28 g/plkm	0,33 g/plkm
HC	0,015 g/plkm	0,012 g/plkm	0,012 g/plkm	0,012 g/plkm
CO	0,037 g/plkm	0,040 g/plkm	0,030 g/plkm	0,035 g/plkm
Partikler	0,0069 g/plkm	0,0085 g/plkm	0,0062 g/plkm	0,0079 g/plkm

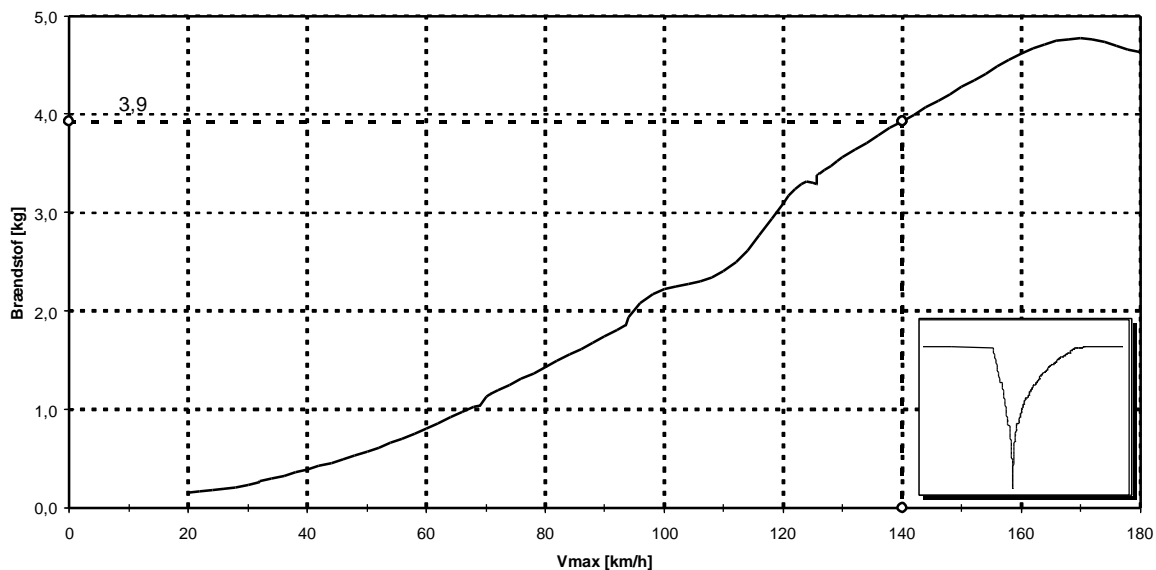
Note: Kun foreløbige resultater, der endnu ikke er verificeret.

Heraf fremgår det, at energiforbruget kan afvige med over 25% afhængigt af hvordan en tur med samme materiel på samme distance er gennemført. De miljømæssige konsekvenser af ændringer i køreplaner mv. kan således bestemmes.

Et andet eksempel er en undersøgelse af standsning af et enkelt IC3-togsæt. Det er her søgt at fastlægge sammenhængen mellem forøgelsen af energiforbruget og den hastigheden toget har før opbremsningen. Resultatet af undersøgelsen fremgår af nedenstående figur.

Banestyrelsen

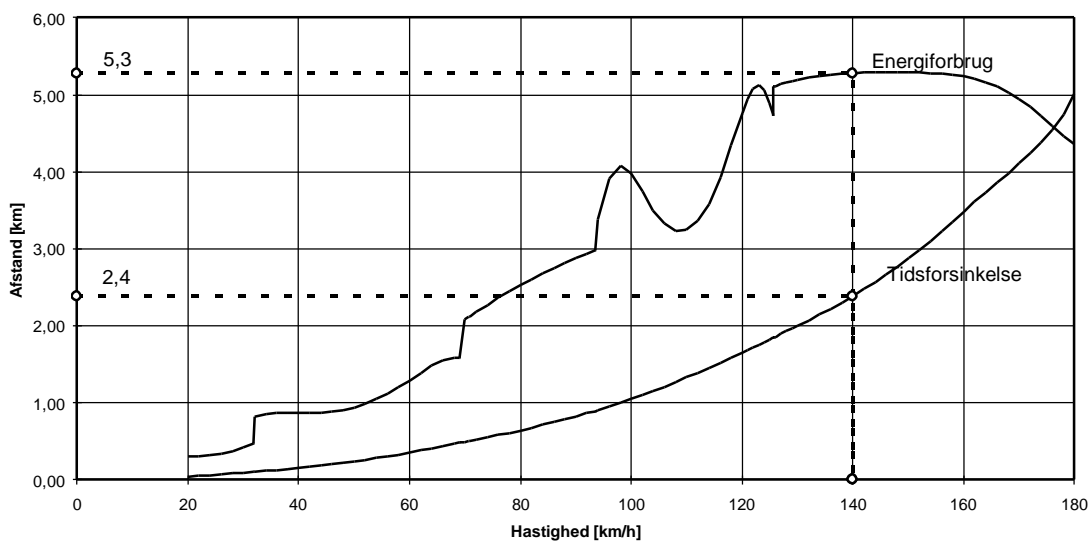
Forøgelse af energiforbrug ved 1 stop: Hvad koster det at standse i forhold til bare at køre videre.



Hvis eksempelvis et IC3-togsæt der kører 140 km/t bringes til standsning, og derefter skal accelereres op igen til 140 km/t, vil det have brugt ca. 3,9 kg brændstof mere end et tog der ikke bringes til standsning.

Dette forhold kan anskueliggøres på en anden måde, nemlig ved at beregne hvor langt et IC3-togsæt kan køre på 3,9 kg brændstof med 140 km/t. Den generelle sammenhæng er vist i nedenstående figur.

Konvertering af tidsforsinkelsen og forøgelsen af brændstofforbruget, forårsaget af en standsning, til kørsel med konstant hastighed.



Som det kan ses af kurven, kan toget køre 5,3 km med 140 km/t på den mængde brændstof der medgår til standsningen og den efterfølgende acceleration.. På samme måde kan det af kurven af-

Banestyrelsen

læses at toget vil bruge lige så lang tid på at køre 2,4 km med 140 km/t som det bruger på tidsforsinkelsen ved standsningen og den efterfølgende acceleration.

6. Resterende arbejder

Inden værktøjet kan finde endelig anvendelse, er det nødvendigt at modellernes rigtighed verificeres. Dette gøres på forskellig måde, bl.a. ved at måle relevante parametre på kørende tog, og derefter gennemføre simuleringer af toget på samme strækning. De beregnede og målte værdier sammenlignes herefter, og eventuelle forskelle skal ligge indenfor bestemte acceptable grænser.

Simuleringsværktøjet planlægges nu udvidet med relevante litra, således at der kan gennemføres simuleringer for alle de tog og strækninger der er i Danmark.

7. Perspektiver for simuleringsværktøjets anvendelse

I Banestyrelsen forventes simuleringsværktøjet anvendt som planlægningsværktøj ved:

- Undersøgelse af generelle sammenhænge mellem energiforbrug og luftemissioner i forskellige scenarier (f.eks. konsekvenser af "knaster" opad eller nedad i hastighedsprofilet)
- Miljøvurdering af nye banestrækninger i forbindelse med VVM-undersøgelser (f.eks. sporudretning og opgradering i Østjylland)
- Miljøvurdering i forbindelse med opgradering af eksisterende baner
- Gennemførelse af konsekvensberegninger i forbindelse med overordnet køreplanlægning
- Uddannelse af trafikstyringspersonale i miljørigtig signalgivning

I DSB forventes simuleringsværktøjet anvendt ved:

- Undersøgelse af generelle sammenhænge mellem energiforbrug og luftemissioner i forskellige scenarier (f.eks. konsekvenser af utilsigtede standsninger, forsinkede tog mv.)
- Indkøb og ændringer af togmateriel
- Gennemførelse af konsekvensberegninger ved alternativ materielanvendelse
- Gennemførelse af konsekvensberegninger ved fastlæggelse af ønsker til fremtidige køreplaner
- Eventuelt uddannelse af lokomotivførere i miljørigtig kørsel

Fælles for disse anvendelser er at det i bedste fald er vanskeligt, tids- og omkostningskrævende, i værste fald umuligt at fremskaffe de nødvendige resultater og sammenhænge v.h.j.a. målinger eller forsøg.

Ved anvendelse af simuleringsværktøjet som støtteværktøj, kan der i stedet relativt enkelt, hurtigt og med få omkostninger opnås den nødvendige viden om de situationer der ønskes belyst.

Banestyrelsen

Dette gælder tillige i uddannelsessituationer, hvor simuleringsværktøjet kan belyse konsekvenser af forskellige metoder til trafikafvikling, forskellige køremåder samt til fastlæggelse af en optimal miljørigtig kørsel.