

# Udvikling og praktisk anvendelse af kapacitetsmodel for jernbaner

Af:

Dorte Filges, DSB stab planlægningskontoret  
Mogens Nielsen, TetraPlan ApS  
Anders Hunæus Kaas, DSB bane rådgivning / DTU-IFP

## **1. Baggrund**

I den nærmeste fremtid stilles der stærkt stigende krav til de danske jernbaner. Med åbningen af faste jernbaneforbindelser over Storebælt, Øresund (og måske Femernbælt), må det forventes, at benyttelsen af det danske hovedbanenet intensiveres kraftigt. I forbindelse med Trafikministeriet's og DSB's aktiviteter i Baneplanudvalget, er det derfor besluttet, at man vil støtte et projekt til udvikling af en EDB-model, som kan simulere jernbanetrafikken på det nuværende og fremtidige danske hovedbanenet. Dette paper omhandler "Kapacitetsmodellen", som er tilblevet gennem et tæt samarbejde mellem DSB, DTU og TetraPlan ApS. Det er således hensigten, at modellen både skal anvendes kommercielt i DSB og forskningsmæssigt i et Ph.D-studie på DTU.

"Kapacitetsmodellen" adskiller sig fra de fleste andre kommercielle jernbanesimuleringsmodeller ved, at den skal benyttes til overordnet strategisk jernbaneplanlægning. Sigtet med modellen er således at kunne identificere større flaskehalse i et jernbanenet, samt at formulere et generelt kapacitetsbegreb for jernbaner. De fleste hidtidige modeller<sup>1</sup> har været kendetegnet ved, at de bl.a. skal kunne bruges til detailprojektering. Der er derfor en tendens til, at disse er meget detaljeret og tungt opbygget. I "Kapacitetsmodellen" er det tilstræbt at opbygge en ukompliceret model, der er let at arbejde med, men som samtidig indeholder mange af de elementer, der indgår i et jernbanesystem i virkelighedens verden. Modellen er derfor velegnet til at gennemteste og sammenligne en række alternativer, hvor enten *driftsoplægget* eller *infrastrukturen* er udbygget/ændret.

Formålet med "Kapacitetsmodellen" er at simulere et stort antal køreplaner, som skal kunne anskueliggøre om en given *infrastruktur* er robust overfor et givet *driftsoplæg*. I "Kapacitetsmodellen" udregnes rejsetiden  $t_r$  for alle de simulerede køreplaner. Denne rejsetid kan opdeles i en ideel køretid  $t_i$ , som findes ved at lade de aktuelle tog være alene i systemet, samt i en spildtid  $t_s$ , som er den ekstra køretid togene påføres, fordi der er flere tog i systemet.

Spildtiden  $t_s$  er omvendt proportional med ledig banekapacitet. Køreplanen med den mindste spildtid vil normalt ikke være den, der er interessant i praksis, da den som oftest giver anledning til konvojkørsel<sup>2</sup>, som ikke er publikumsvenlig.

---

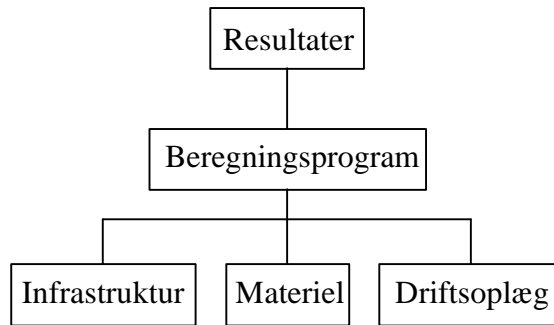
<sup>1</sup> UX-simu (HaCon, Tyskland), SimuVII (IBS, Tyskland) og SIMON (Banverket, Sverige).

<sup>2</sup> Flere ens togtyper kører umiddelbart efter hinanden.

## 2. Modelopbygning

Kapacitetsmodellen er et databaseprogram, som er opbygget omkring en skal, der er programmet i Visual Basic.

Den overordnede datastruktur for modellen er gengivet i nedenstående figur.



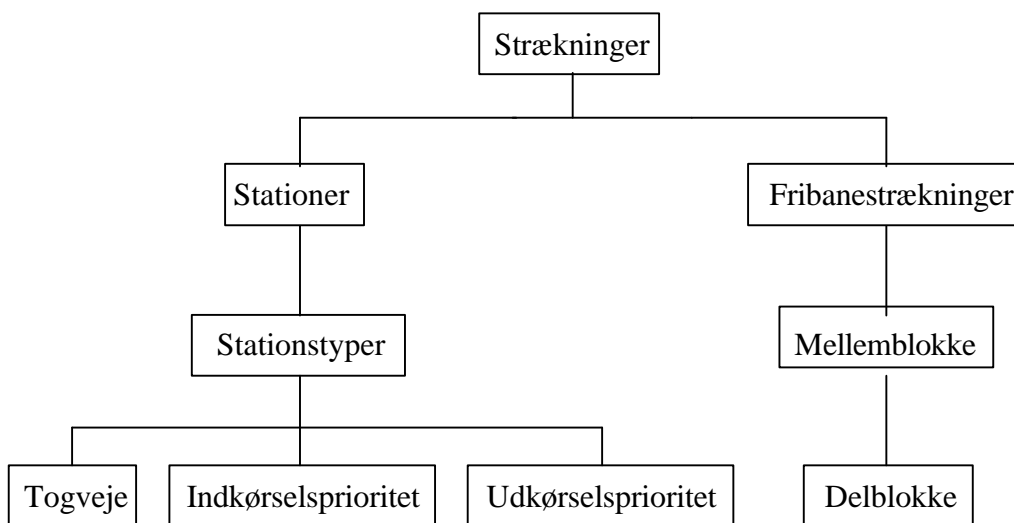
Figur 1 Overordnet databasestruktur i “Kapacitetsmodellen”

*Beregningsprogrammet* henter således data fra databaserne, som indeholder oplysninger om jernbanens *infrastruktur*, det benyttede *materiel* samt *driftsoplægget*.

Såfremt der ikke ønskes en detaljeret gennemgang af modelopbygningen kan afsnittene 2.1 Infrastruktur og 2.2 Materiel overspringes.

### 2.1 Infrastruktur

Infrastrukturen opbygges som en lang kæde af “byggeklodser”, der tilsammen vil udgøre et større jernbanenet, som f.eks. det danske hovedbanenet. Infrastrukturen er opdelt i flere niveauer, som det fremgår af nedenstående figur.



Figur 2 Niveauinddelingen af infrastrukturen i et jernbanenet.

Det øverste niveau er *strækninger*, som indeholder infrastrukturdata for en sammenhængende følge af *stationer* og *fribanestrækninger*. Som eksempel på en strækning kan nævnes infrastrukturen mellem forgreningsstationerne<sup>3</sup> Roskilde og Ringsted.

Definitionen af *stationer* dækker både publikumsstationer<sup>4</sup> og sikringstekniske<sup>5</sup> stationer. Opbygningen af *stationer* foregår ved, at der først defineres en række *stationstyper*, der hver især har en række karakteristika m.h.t. antal perronspor, banegrene samt hovedspor i disse.

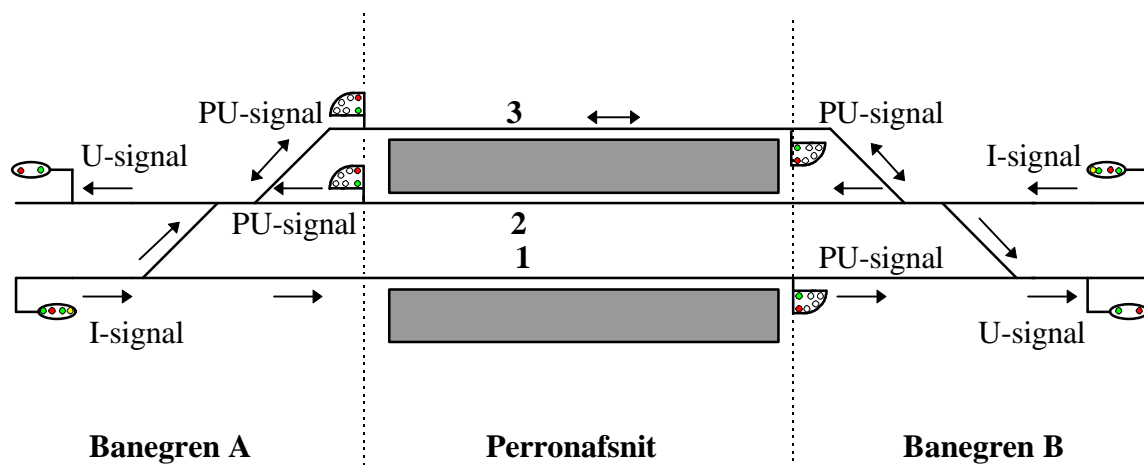
Pt. findes der ca. 70 forskellige *stationstyper* i "Kapacitetsmodellen", som indgår i opbygningen af det nuværende hovedbanenet eller et muligt fremtidigt.

I nedenstående figur er den skematiske spor- og signalplan for en udvalgt *stationstype* (13) gengivet. Den viste *stationstype* bliver bl.a. brugt ved opbygningen af følgende *stationer*: Horsens, Hobro, Sorø og Glostrup fjern.

<sup>3</sup> Stationer med mere end 2 banegrene kaldes forgreningsstationer, mens stationer med kun 1 banegren kaldes endestationer.

<sup>4</sup> Et standsningssted hvor der er mulighed for udveksling af passagerer (dvs. med perroner), men hvor der ikke nødvendigvis er en afgrænsning af "stationen" med ind- og udkørselssignaler (= trinbræt), hvilket er nødvendigt, hvis stationen skal udstyres med sporskifter.

<sup>5</sup> En station som er afgrænset af ind- og udkørselssignaler, og derfor er udstyret med sporskifter til overhaling/krydsning af tog. Stationen er dog ikke nødvendigvis udstyret med perroner, hvorfor udveksling af passagerer ikke nødvendigvis er muligt.



Figur 3 Eksempel på en skematisk spor- og signalplan for en standard *stationstype*.

Alle *stationstyper* er opbygget efter samme princip, nemlig et perronafsnit med et antal perronspor (+ evt. spor uden perronadgang forbeholdt til godstog) samt et antal sporskifte-zoner, der hver især udgør en banegren<sup>6</sup>.

Den viste *stationstype* er karakteriseret ved, at den ligger på en dobbeltsporet strækning (2 hovedspor i banegren A og B). *Stationstypen* har et sideforlagt overhalingsspor med perronadgang, som kan benyttes i begge køreretninger. Der er således ialt 3 perronspor, men da 2 af perronsporene er ensrettet (i hver sin retning), har stationen 2 anvendelige perronspor for tog, som har køreretningen A→B, og et tilsvarende antal for tog med den modsatte køreretning.

For hver *stationstype* beskrives de mulige *togveje*, samt hvilke *togveje* der konflikter med hinanden. Anvendes figur 3 som eksempel, ses det, at det er muligt at stille en indkørselstogvej fra 1. hovedspor i banegren A til perronspor 3. Denne handling vil dog f.eks. udelukke, at der stilles en udkørselstogvej fra perronspor 2 til 2. hovedspor i banegren A, da der er tale om en konflikterende *togveje*. Herved udelukkes alle handlinger, som ikke er fysisk mulige.

Det er endvidere nødvendigt at indføre en hensigtsmæssig disponeringsstrategi for togdriften ved hver *stationstype*, således at sporbenyttelsen kommer til at ligne den, man vil vælge i virkelighedens verden. Det vil dog være umuligt at indbygge den nøjagtige disponeringsstrategi, da den ofte vil bero på et subjektivt valg fra trafikdisponenten (stationsbestyreren). I "Kapacitetsmodellen" kategoriseres togene derfor i følgende 4 klasser:

1. Personførende tog som skal overhales/"krydses"<sup>7</sup> på den aktuelle station.
2. Personførende tog som ikke skal overhales/"krydses" på den aktuelle station.

<sup>6</sup> Måles fra første frispormærke efter perron til U-signal eller fra I-signal til det sidste frispormærke før perron jf. figur 3.

<sup>7</sup> På enkeltsporet strækninger skal 2 tog med forskellig køreretning "krydse" hinanden på en krydsningsstation.

3. Godstog som skal overhales/"krydses" på den aktuelle station.
4. Godstog som ikke skal overhales/"krydses" på den aktuelle station.

Alle tog som befinder sig på en *station*, vil være kategoriseret i en af ovenstående klasser, hvilket benyttes i *indkørsels- og udkørselsprioritet* til at fastsætte den mest hensigtsmæssige togvej for et givet tog.

Det enkelte tog får tildelt sin klasse dels gennem togtypen (personførende tog/godstog) samt dets prioritet jf. afsnit 2.2, og dels gennem oplysninger om tog der evt. ønsker at overhale/"krydse" det pågældende tog.

Et tog kan således godt ændre status fra klasse 1 til 2 på forskellige *stationer*, hvorimod det samme tog ikke kan ændre status fra klasse 1 til 3, da der her er tale to forskellige slags *togtyper*.

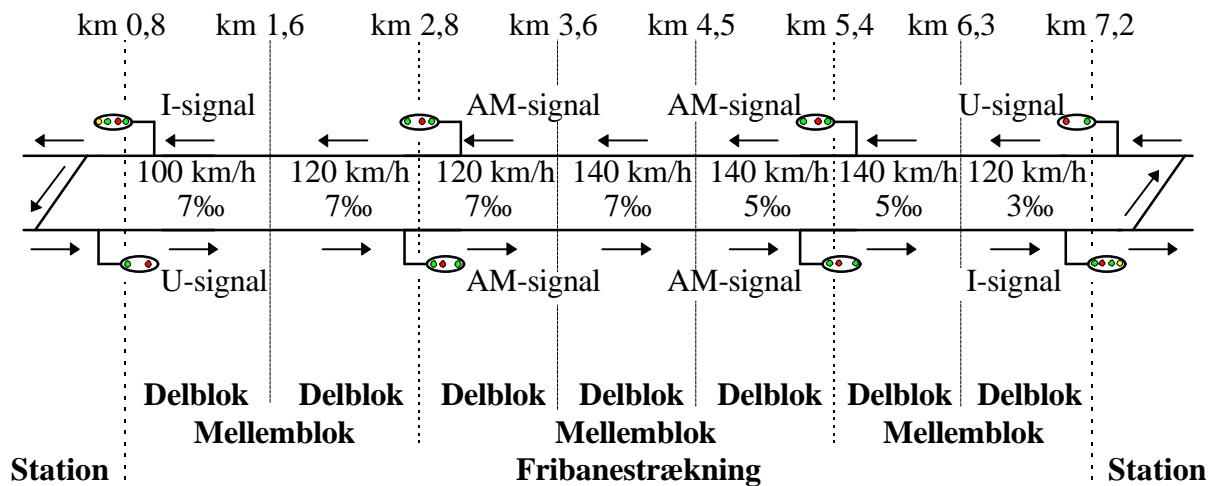
Når en konkret *station* skal opbygges vælges/konstrueres først en *stationstype* med de rigtige overordnede karakteristika. Herefter indlæses specifikke oplysninger, såsom længden af de enkelte banegrene, perronsporslængden, tilladt hastighed ved gennemkørsel ad ret spor, samt den maksimale hastighed gennem sporskifter til/fra vigespor. Disse data forenkles en smule i forhold til virkelighedens verden. Eksempelvis er længden af hovedsporene i den samme banegren ikke nødvendigvis lige lange<sup>8</sup>. Endvidere kan der være forskel i den tilladte ind- og udkørselshastighed for forskellige hovedspor, hvilket ikke er muligt at angive i "Kapacitetsmodellen". Hvad angår perronsporslængden er det ligeledes en fælles længde for perronsporene, der skal angives, hvilket ikke er en eksakt gengivelse af virkeligheden.

Ved stationsopbygningen gives der mulighed for at indtaste den geografiske placering med UTM-koordinater, således at resultaterne kan gengives på et digitalt Danmarkskort jf. figur 8.

Infrastrukturen mellem 2 nabostationer kaldes en *fribanestrækning*. Denne vil være opbygget af en eller flere sikringstekniske *mellemblokke*. Disse blokke sikrer, at togene ikke kolliderer med hinanden, da der i hver *mellemblok* kun må være et tog i det samme hovedspor. Mellemblokkene vil være adskilt af AM-signaler, som det ses af figuren øverst på næste side.

---

<sup>8</sup> Afstanden mellem I-signal (for 1. hovedspor) og U-signal (for 2. hovedspor) vil normalt være ca. 150 m jf. figur 3.



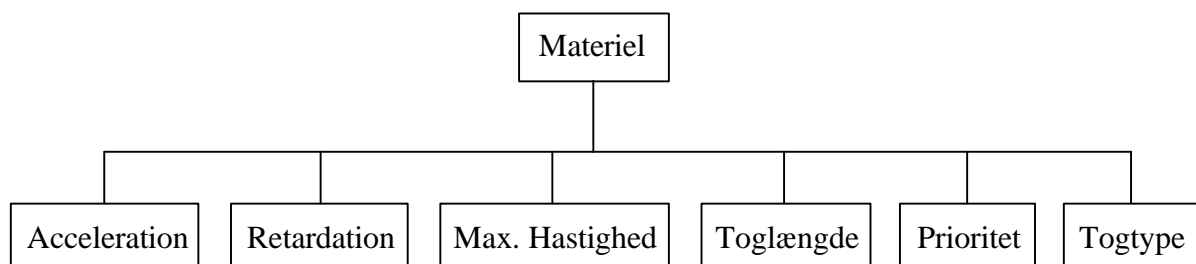
Figur 4 Eksempel på opbygning af en fribanestrækning.

*Mellemblokkene* vil yderligere være opdelt i en eller flere *delblokke*, der hver især får tildelt en længde, banegradiert (stigning/fald), samt den maksimale tilladte strækningshastighed. Hermed åbnes der mulighed for, at der kan indbygges et eller flere gradient- og/eller hastighedsskift i den sikringstekniske *mellemblok*, som det er vist på figur 4.

På niveauet *fribanestrækninger* angives hvormange hovedspor (1, 2, 3 eller 4), der er på det aktuelle banestykke. Et enkeltspor er naturligvis farbart i begge retninger. Et dobbeltspor har retningsdrift<sup>9</sup> med højresporskørsel. På tresporede strækninger er der højresporsdrift på de to yderste spor, mens det midtliggende spor har vekselsporsdrift. Endelig har firesporede strækninger retningsdrift med to spor i hver retning (også højresporskørsel).

## 2.2 Materiel

Det *materiel* der skal køres med på den opbyggede *infrastruktur* indbygges i modellen, ved at der for hver materieltype indtastes følgende relevante parametre.



Figur 5 Materielparametre

<sup>9</sup> Retningsdrift betyder, at der i hvert spor kun køres i én retning (undtagen i forbindelse med driftsuregelmæssigheder, som der dog ikke er taget højde for i "Kapacitetsmodellen").

*Accelerations- og retardationskoefficienterne* [ $m/s^2$ ] angives som funktion af hastigheden med intervaller på ca. 10 km/h. Endvidere angives togets *maksimal hastighed* (på vandret bane).

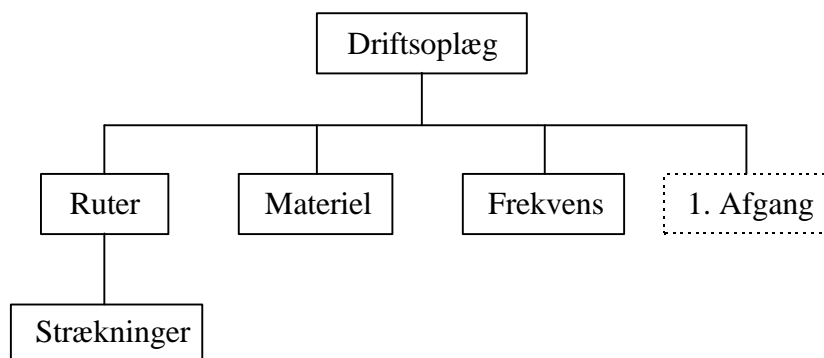
*Toglængden* er ligeledes en vigtig materielparameter, da den dels skal bruges til at afgøre, om et tog kan blive overhalet på en given *station* (er vigesporet tilstrækkelig langt), og endvidere benyttes den til beregning af togfølgeafstande.

Det forskellige *materiel* tildeles en *prioritet*, således at der kan foregå en indbyrdes rangordning af togene. Denne rangordning bruges i *beregningsprogrammet* dels til at kunne håndtere de højest prioriterede tog først i hvert tidsskridt, samt i forbindelse med konfliktløsning (Hvem skal først besætte det samme sporstykke ? - Skal et givet tog overhales ?.....osv.).

Endelig skal det angives, hvilken klasse *togtype* (godstog, regionaltog, EC/IC-tog) *materiellet* tilhører. Dette har bl.a betydning for, om toget skal have perronadgang på *stationer*. Togtypen benyttes endvidere til bestemmelse af størrelsen på igangsætnings-<sup>10</sup> og køreplanstillægget<sup>11</sup>.

## 2.3 Driftsoplæg

Når *infrastrukturen* og *materiellet* er fastsat, kan der ved hjælp af disse enheder opbygges et *driftsoplæg*. Princippet for opbygningen af et driftsoplæg er gengivet nedenfor.



Figur 6 Indgående parametre i driftsoplægget.

Der defineres nogle køreplansmæssige *ruter*, som er opbygget af en eller flere på hinanden følgende *strækninger*. Det angives på hvilke stationer, der skal standses og i givet fald hvor lang holdetiden skal være.

Der udvælges en *materieltype*, som skal køre på den valgte *rute*.

<sup>10</sup> Igangsætningsstillægget er den tid det tager, fra der er givet grønt signal, til toget sætter i gang .

<sup>11</sup> Et tillæg, der skal sikre, at der i køretiden (køreplanen) tages højde for forudsete (f.eks. sporarbejde) og uforudsete (f.eks. forlænget stationsophold p.g.a ekstraordinært mange på-/afstigninger) hændelser.

Hyppigheden af den valgte kombination af *rute* og *materiel* angives som en *frekvens* [ $\text{h}^{-1}$ ], der gentages med faste tidsintervaller.

Såfremt der ønskes resultater fra en konkret køreplan, kan denne indtastes ved at angive *I. afgang* for hver kombination af *rute* og *materiel*. Hermed fastlægges den nøjagtige cyklus for afviklingen af togangen.

## 2.4 Beregningsprogram

Formålet med *beregningsprogrammet* er at simulere et stort antal køreplaner, som skal kunne anskueliggøre om en given *infrastruktur* er robust overfor et givet *driftsoplæg*. Dette gøres ved tilfældigt at udvælge i hvilken rækkefølge og hvornår de forskellige enheder i *driftsoplægget* skal afgå. Herved fremkommer et stort antal kombinationer, som hver især vil repræsentere en mulig køreplan. Alle køreplaner vil dog ikke være lige hensigtsmæssige, da der i en god køreplan skal tages hensyn til publikums ønsker.

Beregningerne i “Kapacitetsmodellen” baserer sig på, at der langs alle spor findes linieblok-leder<sup>12</sup>, samt at alle tog er udstyret med ATC<sup>13</sup>. Dette betyder, at et tog hele tiden kan forsøge at reservere en foranliggende *mellemblok*/stationsblok, hvis dette bliver nødvendigt i forbindelse med kørslen.

Beregningen er en diskret simulationsmodel, hvor alle tog enkeltvis får udregnet deres kørsel indenfor næste tidsskridt, og først derefter frigives de blokke, som togene nu ikke længere benytter.

Rækkefølgen, hvori togene behandles, er bestemt ud fra deres prioritet, samt hvor længe de har holdt stille på den nuværende position.

For hver køreplan som genereres tilfældigt, gøres det på følgende måde. Der udvælges et tidspunkt for hver kombination af *rute* og *materiel*. Dette tidspunkt repræsenterer *I. afgang*, og de efterfølgende afgang er bestemt af *frekvensen*, som disse tog skal sendes afsted med.

Opsamlingen af spildtiden foregår på et af brugeren valgt interval. Da nettet er helt tomt ved simulationens start, vil man normalt vente med at starte opsamlingen, indtil at en ligevægtssituation er opstået.

## 2.5 Resultater

I figuren på næste side er der foretaget en simulering af 500 tilfældige køreplaner på det eksisterende banenet øst for Storebælt. Som *driftsoplæg* er der benyttet sommer '96 i morgenmyldretiden.

Køreplanerne er rangordnet, således at den køreplan med mindst spildtid får nr. 1, mens den med størst spildtid får nr. 500.

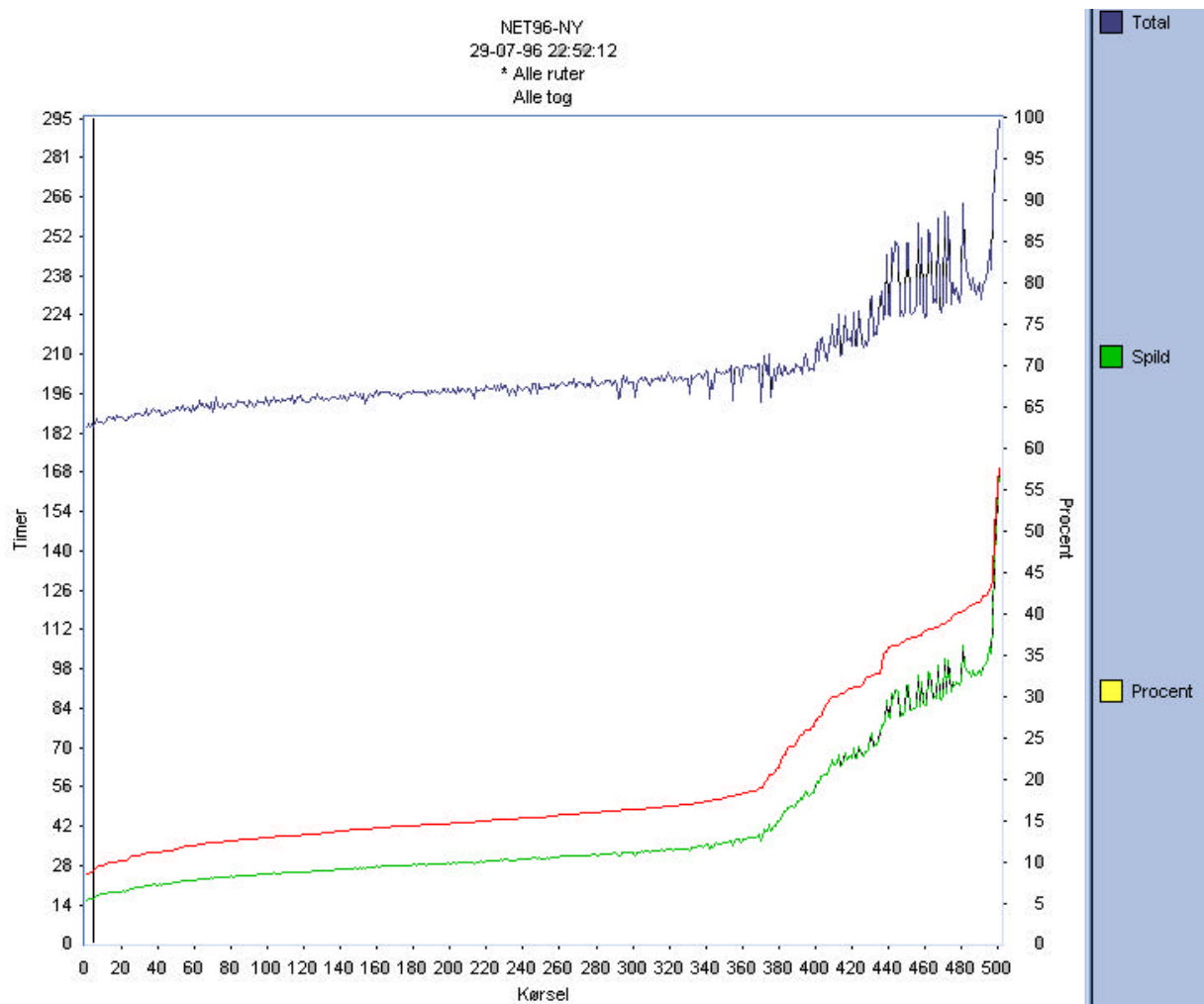
---

<sup>12</sup> Med linieleder kendes togenes nøjagtige position, hvilket betyder, at togfølgen kan gøres “tættere”.

<sup>13</sup> Automatic Train Control.



Dagens køreplan (nr. 5) er vist som den lodrette streg til venstre, der altså hører blandt de bedste, hvad angår spildtiden !



Figur 7 Spildtiden for 500 køreplaner på net øst for Storebælt<sup>14</sup>.

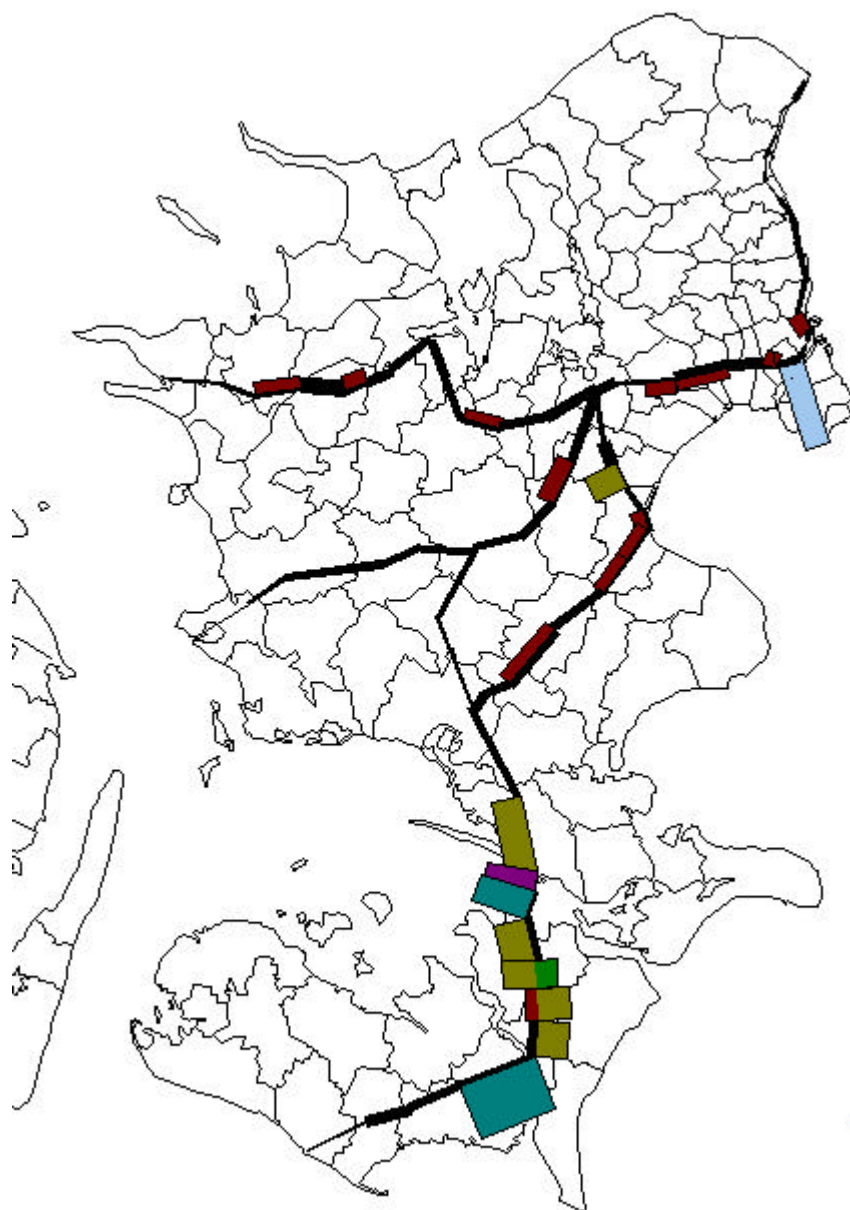
På figuren er vist 3 kurver:

- Total køretid (øverste kurve) for den aktuelle køreplan i simuleringsperioden (aflæses på venstre y-akse).
- Spildtid (nederste kurve) for den aktuelle køreplan i simuleringsperioden (aflæses på venstre y-akse).
- Spildtidsprocenten (midterste kurve) for den aktuelle køreplan i simuleringsperioden (aflæses på højre y-akse).

Kurveforløbet for spildtidsprocenten indikerer, hvor robust en *infrastruktur* er over for et *driftsoplæg*. Således vil en meget stejl kurve fortælle, at der kun er en meget lille

<sup>14</sup> Det er endvidere muligt, at vise spildtidsresultaterne for udvalgt *materiel* og *ruter*.

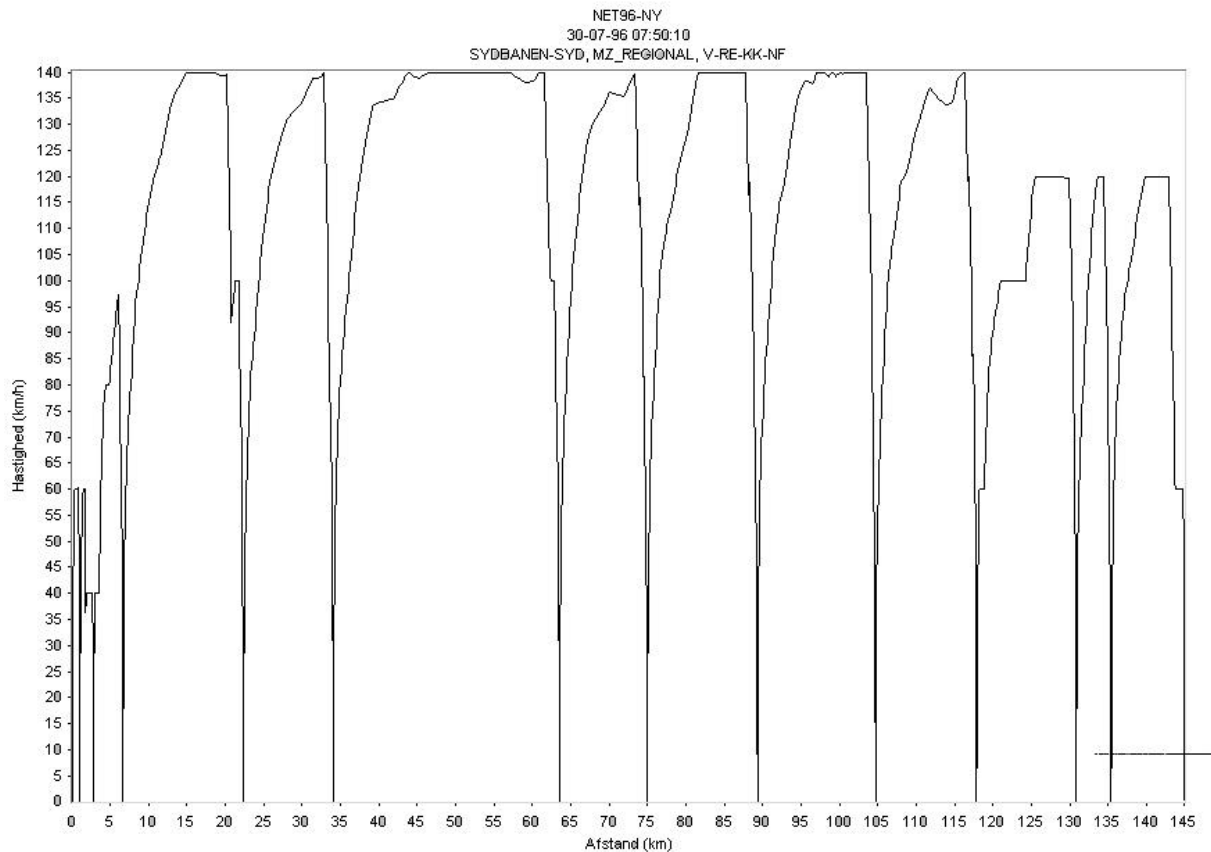
kapacitetsreserve på den aktuelle *infrastruktur*, hvilket giver sig udtryk i, at der fås meget store spildtider, hvis der vælges en uheldig køreplan (f.eks. ved driftsforstyrrelser). Omvendt vil en flad kurve være tegn på, at der er en stor kapacitetsreserve, da spildtiden bliver forholdsvis lille, uanset hvor u hensigtsmæssigt man sammensætter køreplanen. Figuren nedenfor viser på et digitalt Danmarkskort, hvor på nettet spildtiden opsamles. Det viste eksempel gælder for dagens køreplan i morgenmyldretiden. Ikke overraskende ses det, at spildtiden er størst på *strækningerne* omkring København H, men også i mindre omfang mellem Roskilde og Ringsted. Endvidere kan der observeres små problemer på de enkeltsporede *strækninger* Vordingborg - Rødby Færge, Roskilde - Køge - Næstved samt Roskilde - Kalundborg (der er dog dobbeltspor på *fribanestrækningerne* Roskilde - Lejre og Vipperød - Holbæk).



Figur 8 Spildtiden (retningsorienteret) for dagens køreplan (morgen) beregnet med “Kapacitetsmodellen”.

Ligesom det er muligt at præsentere spildtiden for en konkret køreplan, er det også muligt at vise den gennemsnitlige spildtid for samtlige simulerede køreplaner. Herved opnås netop, at der ikke fokuseres på den aktuelle køreplan, som måske kun har en kort gyldighedsperiode.

Figuren nedenfor viser kørselsmønsteret (hastigheden som funktion af stedet) for et regionaltog på *strækningen* Østerport (km 0) - Nykøbing F (km 145). Denne funktion benyttes primært for at kunne fejlsøge programmet. Det kan således undersøges, om de maksimale hastigheder er overholdt, og om der standses ved de ønskede *stationer*.



Figur 9 Kørselsmønsteret for et regionaltog på *strækningen* Østerport og Nykøbing F.

### **3. Anvendelse af Kapacitetsmodellen**

“Kapacitetsmodellen” kan anvendes i forbindelse med overordnet strategisk jernbaneplanlægning, samt til samfundsøkonomiske vurderinger af alternative udbygninger af infrastrukturen eller prioritering af toggangen. “Kapacitetsmodellen” giver samtidig anledning til at formulere et generelt kapacitetsbegreb for en jernbane. Koblingen over til en samfundsøkonomisk effektvurdering er i denne sammenhæng meget central.

Ved at simulere et stort antal tilfældige køreplaner, der skulle være repræsentative for alle tænkelige køreplaner, generaliseres kapacitetsproblemet. Programmet er således ikke beregnet til køreplanlægning eller til beregning af, hvor der f.eks. skal opstilles signaler. Det er derimod et planlægningsværktøj beregnet til at kvantificere effekten af konkrete investeringer i *infrastrukturen* eller belastningen af at introducere højhastighedstog eller ændret standsningsmønster på en *strækning*, som medfører en mere eller mindre uensartet trafiksammensætning.

Åbningen af de faste forbindelser over Storebælt og Øresund samt banen til Københavns Lufthavn vil i de kommende år give mulighed for øget efterspørgsel af togtrafikken.

En øget trafik og en eventuel indførsel af højhastighedstog vil betyde, at højhastighedstog, regionaltog og godstog vil skulle konkurrere om kapaciteten på banenettet. Over en stor del af banenettet har jernbanen en betydelig kapacitetsreserve, men da togene som regel ikke kan undgå de belastede *strækninger*, udgør disse en begrænsning for det samlede system. Allerede i dag er *strækningen* mellem København og Høje Taastrup hårdt belastet, og udgør dermed en flaskehals. En øget trafik vil endvidere kunne give flaskehalse især på *strækningen* mellem København og Ringsted, men også på *strækningen* over Vestfyn. “Kapacitetsmodellen” kan anvendes til værdisætning af alternative kapacitetsfremmende tiltag på bl.a. ovennævnte *strækninger*.

Endvidere vil den enkeltsporede *strækning* mellem Vordingborg og Rødby Færge i tilfælde af en fast forbindelse over Femerbælt udgøre en flaskehals. Det kan således vurderes hvor meget trafik, der vil kunne afvikles på et enkeltspor til sammenligning med udbygning til dobbeltspor.