

# EDB-simuleringsmodeller til brug ved jernbaneplanlægning

Af:

Dr.-Ing. Volker Klahn, IBS Hannover<sup>1</sup>

Civ. Ing. Anders Hunæus Kaas, IFP-DTU<sup>2</sup>/Banestyrelsen rådgivning<sup>3</sup>

## **1. Baggrund**

Fremtidens jernbanedrift vil stille nye og store krav til jernbaneplanlæggerne. Med banernes liberalisering vil det betyde, at banerne skal kunne udnyttes mere fleksibelt. Dette vil ligeledes afstedkomme, at der ofte vil være tale om komplekse planlægningsopgaver, som kun vanskeligt lader sig løse med almindelig "købmandsregning".

Planlægningen af jernbanedriften kan opdeles i følgende 3 trin:

- Strategisk
- Taktisk
- Operationel

I det følgende beskrives de 3 forskellige planlægningsniveauer, og efterfølgende gives der en række eksempler på hvilke EDB-modeller, som kan benyttes til støtte ved jernbaneplanlægning.

### **1.1 Strategisk planlægning**

Det øverste strategiske niveau vil typisk vedrøre opgaver, som befinder sig i en indledende planlægningsfase. Der vil således være store usikkerheder omkring projektets endelige udformning. En sådan opgavetype vil derfor kun indeholde en række overordnede retningslinier og forudsætninger. Disse opgaver vil ligeledes ofte være vidt strækkende (f.eks. København - Århus).

Ved den strategiske planlægning vil tidshorisonten fra planlægning til ibrugtagning typisk være ca. 5 - 10 år. Der vil derfor typisk være tale om projekter, hvor den nøjagtige infrastruktur ikke kendes og køreplanen vil ligeledes være ukendt. Derimod vil et driftsoplæg (der beskriver antal tog, type og rute, men ikke den indbyrdes rækkefølge) kunne beskrive driften. Da der både er nogen usikkerhed omkring infrastrukturen og driften er det rimeligt at benytte en forsimplet model, som på baggrund af de forhåndenværende data, kan give et fingerpeg om en langsigtet plan virker realistisk ved at undersøge flere forskellige alternativer.

### **1.2 Taktisk planlægning (detailprojektering)**

Ved mindre ændringer af infrastrukturen, køreplansskift eller længerevarende sporspærringer er det nødvendigt at foretage en taktisk planlægning. Til dette formål vil man benytte nogle EDB-modeller, som med stor nøjagtighed kan beskrive infrastrukturen og driften på denne. Da tidshorisonten fra planlægning til udførelse her typisk vil være fra ca. et par måneder til et par år, vil der ikke være den helt store usikkerhed om, hvordan infrastrukturen og køreplanen nøjagtigt vil se ud. De benyttede modeller kan således beskrive, hvorledes regulariteten med

---

<sup>1</sup> Roscherstraße 7, D-30161 Hannover

<sup>2</sup> Bygning 115, DK-2800 Lyngby

<sup>3</sup> Møntergade 5, 4.sal, DK-1116 København K

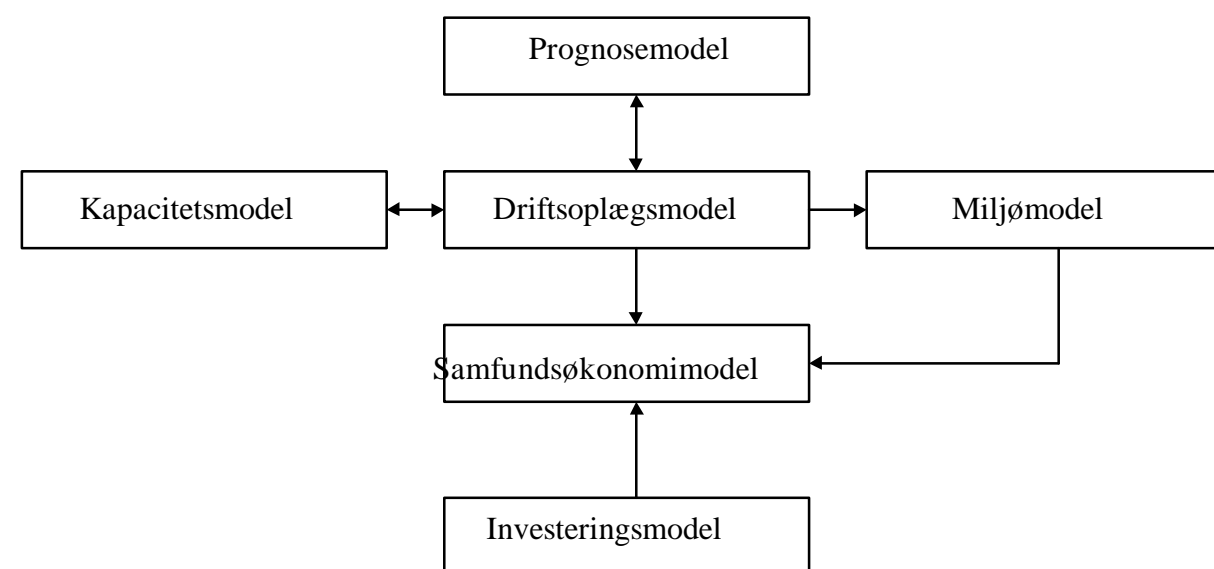
den givne kombination af infrastruktur og køreplan vil blive, hvis man påfører køreplanen (eller infrastrukturen) nogle sandsynlige forstyrrelser.

### **1.3 Operationel planlægning**

Den operationelle planlægning er i princippet den som foregår nu og her. Dvs. i forbindelse med driftsforstyrrelser, særtog og kortvarige spæringer. Til denne planlægning, må man nøjagtigt vide hvad infrastrukturen kan yde, og hvordan køreplanen ser ud. Denne planlægning vil oftest ske i driftscentralerne ved hjælp af vej-/tidsdiagrammer (grafiske køreplaner) og arbejdsplaner, som løbende kan opdateres med henblik på konfliktløsning.

## **2. Modeller fra Banestyrelsen**

I forbindelse med Baneplanudvalgets<sup>4</sup> arbejde med opstilling af en overordnet plan for det danske hovedbanenet, er der blevet benyttet en række EDB-analysemodeller. Disse er karakteriseret ved at skulle kunne besvare langsigtede planlægnings spørgsmål.



Figur 1 Modelkompleks til strategisk jernbaneplanlægning [1]

I det følgende vil de enkelte programmoduler kort blive beskrevet.

### **2.1 Prognosemodel**

Der er i Baneplanudvalgets regi blevet udviklet en landstrafikmodel, som har til formål at kortlægge transportefterspørgslen mellem forskellige rejserelationer i Danmark. Herved har det været muligt at vurdere udviklingen i antallet af togrejsende under hensyntagen til forskellige tiltag (f.eks. fast Storebæltsforbindelse). Rejsestrømmene genereres ud fra kendskabet til det nuværende (1994) adfærdsmønster. Ændringer i rejsetider, frekvens, pris og komfort set i forhold til 1994-situationen vil således danne grundlag for nogle ændrede rejsestrømme.

---

<sup>4</sup> Udvalget har været nedsat af Trafikministeriet med repræsentanter fra DSB og Banestyrelsen

Danmark er inddelt i 1030 zoner, som hver især genererer og attraherer nogle rejser. Disse rejser vil fordeles på de forskellige transportmidler og ruter ud fra kendskabet til de rejsendes transportmiddelvalg og villighed til at vælge andet transportmiddel, hvis forhold omkring rejsetid mm. ændrer sig.

## **2.2 Kapacitetsmodel**

Kapacitetsmodellen er udviklet som led i et Ph.D-studie om jernbanekapacitet. Modelopbygningen mm. er detaljeret beskrevet i [2] (Trafikdage '96 bind 2 side 835 - 845), hvorfor der her kun vil komme en kort beskrivelse.

Udgangspunktet i kapacitetsmodellen er ud fra en forholdsvis simpel modelopbygning, at kunne give nogle fingerpeg om, hvordan en given kombination af infrastruktur og driftsoplæg vil kunne afvikle trafikken. Da usikkerheden med mht. til den nøjagtige køreplansudformning er meget stor, simuleres et stort antal forskellige køreplaner (ca. 100) ud fra det fastlagte driftsoplæg.

I Kapacitetsmodellen arbejdes med spildtider, som tilkendegiver hvor meget ekstra køretid, togene påføres ved kørsel af en køreplan, fordi der er mange tog i systemet, som dermed udelukker en optimal kørsel for alle tog.

## **2.3 Driftsoplægsmode**

Driftsoplægget tilkendegiver hvor hyppigt de forskellige tog skal køre. De forskellige tog er karakteriseret ved type, rute og standsningsmønstre. Driftsoplægsmodellen er tæt knyttet til alle de øvrige modeller, og leverer således input og/eller output til disse. Driftsoplægget vil således stabiliseres efter en iterativ proces, hvor de forskellige modeller er gennemløbet flere gange. Det endelige driftsoplæg vil således være "driftsøkonomisk optimalt" under hensyntagen til kapacitets- og miljøforhold. Sådant "burde" modellen fungere, men pga. kompleksiteten vil der kun være tale om en suboptimering.

## **2.4 Miljømodel**

For alle de udførte rejser laves et miljøregnskab, som tager højde for hvilket transportmiddel der benyttes. De miljøfaktorer som helt eller delvist undersøges er luftforurening, CO<sub>2</sub> - emissioner, støj, uheld og trængselsforhold. Ved at multiplicere det udførte trafikarbejde med nogle eksternalitetsomkostninger opnås et miljøregnskab, som benyttes i samfundsøkonomimodellen.

## **2.5 Investeringsmodel**

I forbindelse med infrastrukturudbygninger eller anvendelse af nyt materiel vil der skulle foretages nogle investeringer. Typisk vil man operere med flere forskellige alternativer (f.eks. fuld eller delvis udbygning). Alternativerne kan herefter overføres til samfundsøkonomimodellen, hvor sammenligningen af de enkelte alternativer foretages.

## **2.6 Samfundsøkonomimodel**

I samfundsøkonomimodellen foretages en samlet cost/benefit vurdering af de enkelte alternativer. I denne analyse indgår anlægsinvesteringer, driftsomkostninger for infrastruktur, konsu-

mentoverskud, eksternaliteter, skatter & afgifter, værdi af overflyttet trafik til tog samt producentoverskud.

### **3. Modeller fra IVE/IBS**

Instituttet for trafik, jernbanebygning og -drift (IVE) ved Universitetet i Hannover har gennem ca. 20 år beskæftiget sig med udvikling af computermodeller, som kan benyttes til at simulere jernbanetrafik.

Modellerne har således fulgt den generelle udvikling indenfor computerprogrammer hvad bl.a. angår brugervenlighed, simulationshastighed, modelkompleksitet m.m. Endvidere er der opstået en hel "familie" af programmer, som benytter fælles data (infrastruktur, materiel, køreplan/ driftsoplæg m.m), men som hver især behandler deres eget tema indenfor jernbanedrift. Modellerne er primært opstået som et led i diverse doktorarbejder, og er ligeledes udviklet samt gennemtestet i adskillige afgangsprojekter og kursusarbejder for civilingeniørstuderende. Modellerne har således en høj standard, da der har været de(n) fornødne tid og ressourcer til at udvikle programmerne. Flere baneselskaber (bl.a ÖBB - Østrig, nærtrafik Niedersachsen og Hamburger Hochbahn AG) har således købt modellerne, da de er praktiske i forbindelse med diverse former for jernbaneplanlægning.

#### **3.1 SIMU-VII**

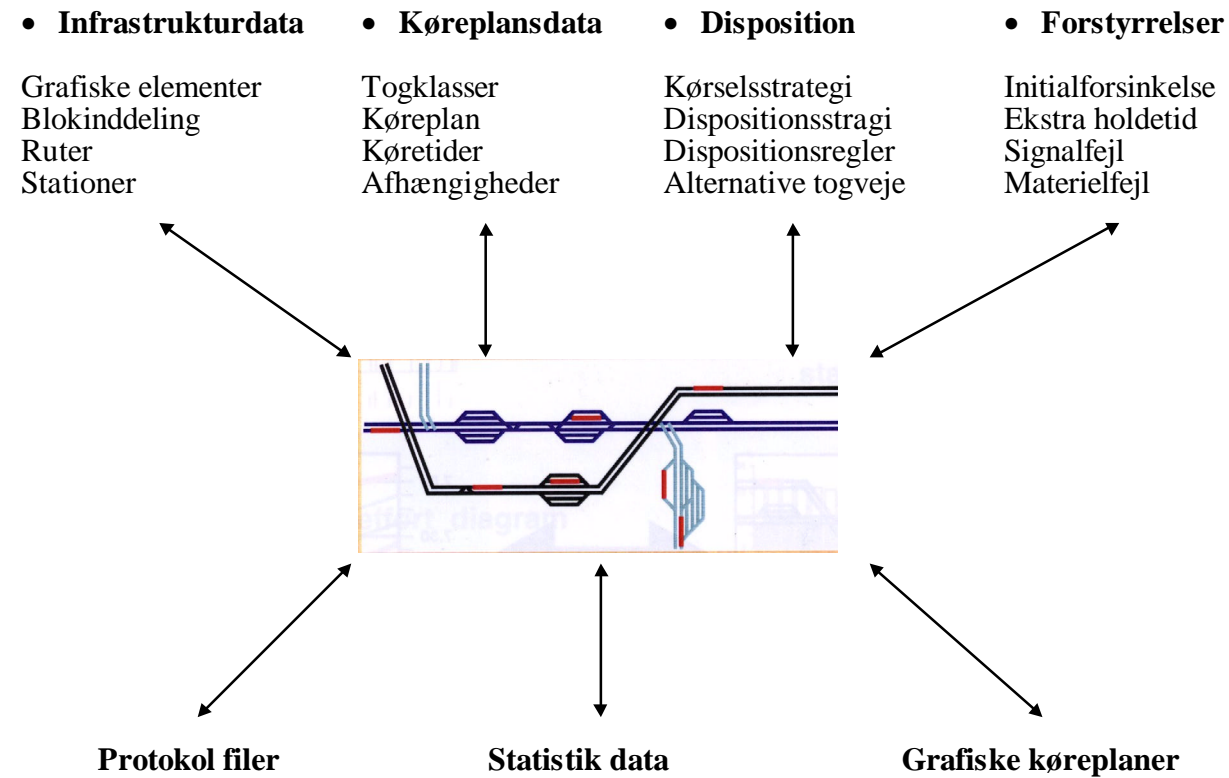
SIMU-modellerne er de grundlæggende og ældste af modellerne. Den første SIMU-I stammer helt tilbage fra 1977. I 1985 blev SIMU-V udviklet på universitetet. Herefter er der sket en forgrening af SIMU-modellerne, én som det private ingeniørfirma Hacon har stået for, samt én der er blevet udviklet på universitet og markedsført af det private ingeniørfirma IBS. I 1988 blev SIMU-VI og 3 år senere SIMU-VII udviklet på universitetet. I samme periode har Hacon først udviklet PC-SIMU og siden UX-SIMU, hvilket er modeller, der hidtil har været anvendt i DSB trafikstyring og nu senest også i Banestyrelsen rådgivning.

Ved jernbanedrift eksisterer der et stort antal afhængigheder, som man må være opmærksom på i forbindelse med jernbaneplanlægning. Sporføringen (infrastrukturen) og sikringssystemet giver således forskellige togvejskonflikter, som må udelukkes. Driftsmæssige og trafikale bindinger (togomløb og passageromstigninger) giver ligeledes en række indskrænkninger. Ved driftsforstyrrelser opstår derfor et stort antal følgevirkninger, som i praksis kun kan synliggøres ved en computerberegning.

SIMU-VII er således velegnet til at foretage disse undersøgelser. SIMU-VII arbejder på UNIX-Workstation ved hjælp af grafteoretiske metoder, således at infrastrukturen gengives på skærmen i form af knuder og kanter.

Ved beregningerne medtages alle for jernbanedriftens væsentlige parametre (f.eks. togenes kørselsdynamik, togvejskonflikter, togfølgetider og togdisponering). Gennem den mangeårige udvikling af SIMU-modellerne er det således nu muligt at løse en lang række forskellige problemstillinger på en given infrastruktur. Konsekvenserne ved forskellige signalsystemer, kørselsstrategier og specielle afhængigheder mellem de enkelte tog kan således afbilledes på realistisk vis.

Gennem modelopbygningen kan såvel lokalt begrænsede (f.eks. enkelte stationer), lange strækninger samt komplekse netværk (f.eks. det danske hovedbanenet) undersøges.



Figur 2 Modelopbygning i SIMU-VII [3]

### 3.2 BAUPLAN

Vedligeholdelsen af den eksisterende infrastruktur har betydning ved planlægning af jernbane-drift. Disse regelmæssigt gennemførte arbejder fører nemlig til sporspæringer og/eller langsom kørsel, således at den ønskede køreplan ikke mere kan afvikles uden forsinkelser. For at formidle de nødvendige køreplansafvigelser og begrænse konsekvenserne for de højest prioriterede tog, fremstilles grafiske oversigter, som trafikdisponenterne kan benytte. Hidtil er disse oversigter fremstillet "i hånden".

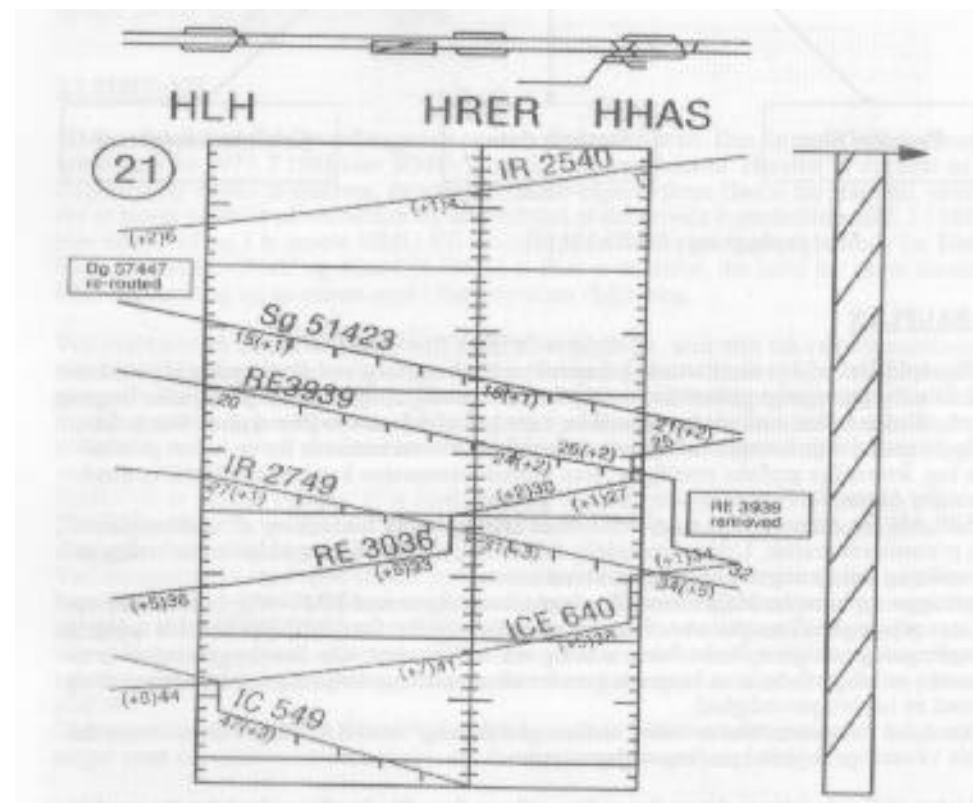
BAUPLAN gør det nu muligt at lave en computerunderstøttet fremstilling af "nødkøreplanen", som præsenteres grafisk. Udover en tydelig forkortelse af bearbejdningstiden er det muligt at fremstille og sammenligne forskellige driftsvarianter.

Stræknings- og køreplansdata leveres fra simulationsprogrammet SIMU-VII, hvorved der opnås stor nøjagtighed i resultaterne. Gennem specielle moduler fra SIMU-VII kan den nøjagtige belægningsdøgnvariation fremstilles grafisk og evt. modificeres. Alle disse byggeklodser er integreret i en brugerflade, som brugeren gennem sin simple musebetjening har let adgang til og dermed en høj brugervenlighed.

Gennem den computerunderstøttede "nødkøreplanlægning" med BAUPLAN forekommer følgende væsentlige fordele i planlægningsprocessen.

- I løbet af få sekunder er det muligt at fremstille en fornuftig "nødkøreplan" for det område, der er berørt af vedligeholdelses-/anlægsarbejder.
- Automatisk fremføring af togene på de farbare spor under driftsindskrænkningerne samt beregning og fremvisning af de deraf resulterende køretidstab.

- Konfliktløsningsalgoritme med automatisk erkendelse samt fjernelse af togvejskonflikter og ikke tilstrækkelige togfølgetider.
- Interaktiv bearbejdning af den grafiske oversigt med resultatlister.
- Fremstilling af grafiske oversigter med flere LA-arbejder<sup>5</sup> på en strækning under betragtning af deres indbyrdes indflydelse.
- Tilpasning af den grafiske oversigt på de foreliggende opgaveproblemstillinger.



Figur 3 Grafisk køreplan fremkommet ved anvendelse af BAUPLAN [4]

<sup>5</sup> Anlæg-/vedligeholdelsesarbejder på banestrækningerne, som medfører LAngsom kørsel

### **3.3 DISPO**

Ved optimering af driftsforløb og materielindsats i et omfangsrigt jernbanenet er det pga. komplekse problemstillinger vanskelig at finde den (eller en af de) bedste løsning(er). Specielt i store strækingsnet med mange forskellige togsystemer, på vendestationer og ved driftsmæssige usædvanligheder er det værdifuldt at benytte en EDB-model til planlægningen. EDB-modellen DISPO udregner på grundlag af en matematisk eksakt kørsel en optimal indsatsplanlægning af materiellet under hensyntagen til alle foregivende randbetingelser.

Problemet med materielindsatsplanlægningen bliver i DISPO eksakt løst og afbildet ved hjælp af grafteoretiske kørsler. For alle relevante randbetingelser ved jernbanedrift kan nøjagtighedskravet afpasses, således at systemet hurtigst muligt frembringer en løsning. De interaktive indgrebsmuligheder tillader at brugeren på komfortabel vis kan undersøge forskellige planlægningsønsker.

DISPO tilbyder en række indsatsmuligheder for brugeren:

- **Indsatsplanlægning for materiel**

Optimeringen af indsatsplanlægningen for materiellet er det oprindelige anvendelsesfelt. Som led i regel- og forplanlægning er f.eks. fremstillingen af maskinløbsplaner for mere end 100 lokomotiver muligt, der bliver indsat i store strækingsnet. Derved bliver samtidig antallet af indsatte maskiner såvel som antallet af tomkørsler og tomkørselskilometre minimeret under iagttagelse af de driftsmæssige randbetingelser. Som grænsefunktion er det bl.a. muligt at inddrage afgiftsstørrelser som f.eks. infrastrukturafgifter.

- **Vedligeholdelse/eftersyn af materiel**

På grundlag af de normale maskinløb bliver vedligeholdelse og eftersyn af materiellet gennemført. Derved bliver tilsvarende de angivne tidsintervaller for de ønskede undersøgelser integreret i omløbsplanen.

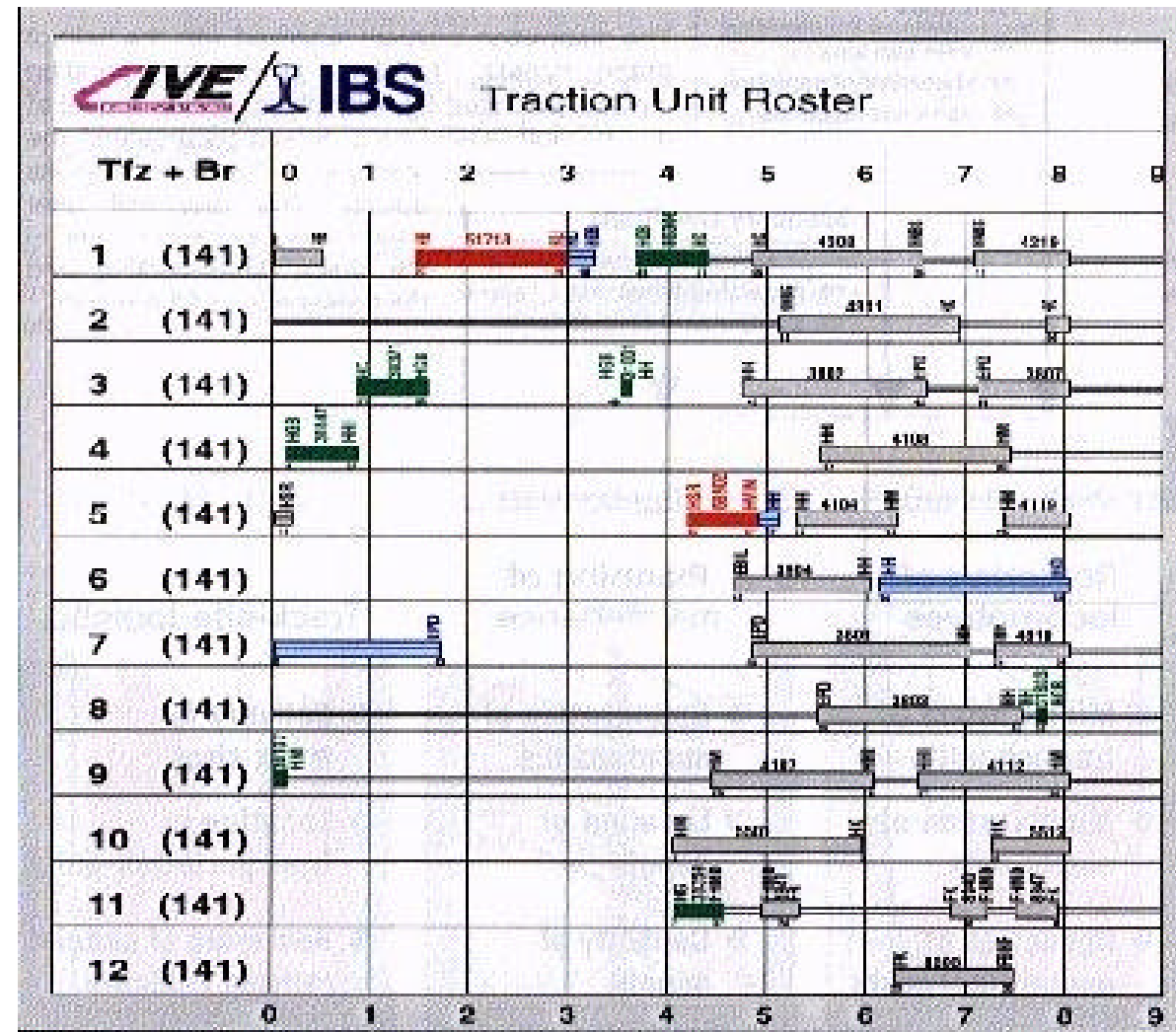
- **Oprangering (Opbygningslogistik)**

Til indsatsplanlægning af vognes opbygningslogistik (f.eks. lange godstog) tjener såvel det videreudviklede DISPO-modul som specielle interaktive bearbejdningsmuligheder.

- **Ad-Hoc indsatsplanlægning ved driftsforstyrrelser**

Ved kortfristet materieludfald o.lign. er DISPO pga. sine hurtige svartider og løsningsmetoder særdeles velegnet.

Til fremstilling af DISPO-resultaterne står forskellige grafiske redskaber til rådighed. Udover maskinløbsplanen kan der bl.a. på skærmen og/eller printer fremstilles "vendelister", belægningsdøgnvariation, planlagte vendetider eller omkostningsorienterede udnyttelser.



Figur 4 Maskinomløbsplan fremstillet ved hjælp af DISPO [5]

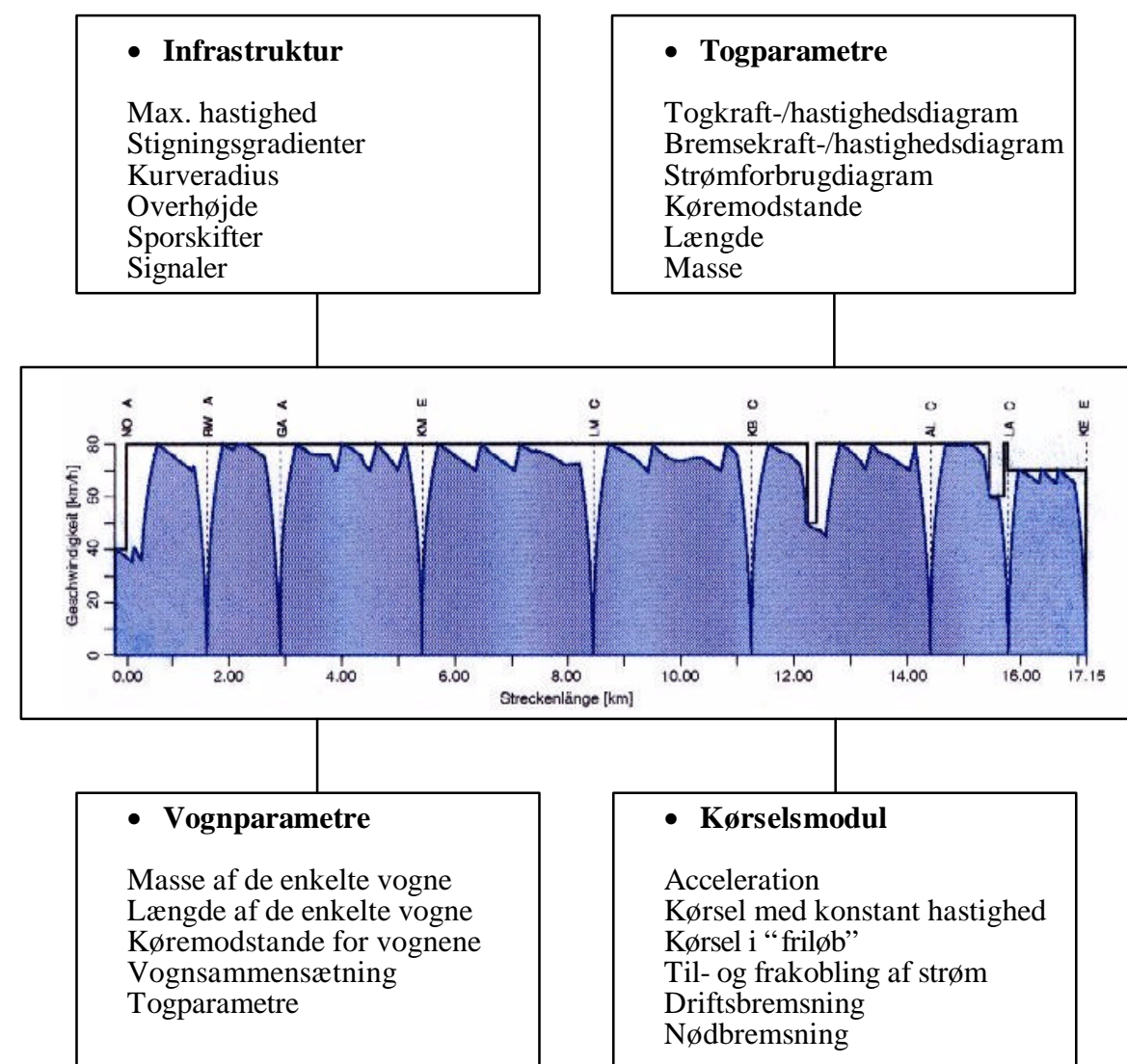
### 3.4 DYNAMIS

Formidlingen af meget præcise køretider er en forudsætning for at kunne besvare jernbandedriftsmæssige spørgsmål. I denne forbindelse er det nødvendigt at modellere det fysiske grundlag, togenes kørsel, samt de tekniske randbetingelser. Resultaterne fra modelberegningerne leverer vigtige basisdata til den videre planlægning, som f.eks. køreplanskonstruktion, beregning af energiforbrug eller koncepter for ny togteknologi.

Det interaktive programsystem DYNAMIS er velegnet til undersøgelse af kørselsdynamiske spørgsmål. Hidtil er DYNAMIS blevet benyttet til et stort antal driftsundersøgelser til både fjern-, nær-, og bybanetrafik, bl.a. ved Hamburg nærbane.

DYNAMIS behandler følgende modelkomponenter som det fremgår af figuren øverst på næste side.





Figur 5 Funktionaliteter i DYNAMIS

Alt efter opgavebeskrivelsen formidles mindste køretider eller energiforbrug, således at DYNAMIS indstiller kørselsmodulet som nødvendigt.

Den grafiske brugerflade gør det muligt for brugeren at sammenfatte og bearbejde togsæt-, lokomotiv- og vogndata. Materiellets karakteristiske kurver (f.eks. togtkraft-/hastighedsdiagram eller bremsekraft-/hastighedsdiagram) bliver ligeledes visualiseret. Grafikken kan præsenteres med de ønskede kommentarer, hjælpelinier og målestørrelser.

Ligeledes er det muligt at vise tid-/steddiagrammer og arbejde-/steddiagrammer for en konkret kombination af materiel og infrastruktur.

Til bearbejdning af strækingsdata benyttes det interaktive system SIMUGRA, som er en del af det tidligere beskrevne program SIMU VII. Alternativt kan infrastrukturdata overføres direkte fra en database, som indeholder de nødvendige oplysninger.

De udregnede statistiske resultater kan f.eks. overføres til MS-Excel til videre bearbejdning.

DYNAMIS giver følgende anvendelsesmuligheder:

- **Beregning af køretider for forskellige driftsoplæg**

Beregningen af den mindste køretid var den oprindelige hensigt med DYNAMIS. Resultaterne præsenteres såvel i grafiske diagrammer som i tabeller. Den grafiske fremstilling kan suppleres med en række tillægsinformationer og kommentarer (f.eks. placeringen af tunnelstrækninger).

- **Bestemmelse af signalplaceringer, sikkerhedsafstande og andre sikkerhedsforanstaltninger**

Bremsning før et signal eller tvangsbremsning til et bestemt punkt kan gennemføres interaktivt med DYNAMIS. Ved nedbremsningsberegningen kan alle parametre varieres, således at en dimensioneringen af sikkerhedsforanstaltningerne for alle togsystemer er mulig.

- **Definition af ydelsesaspekter i forbindelse med materieludvikling**

En række ønskede fysiske egenskaber til det fremtidige materiel kan bestemmes ved at udregne konsekvenserne for en række alternativer med forskellige materielparametre på en given infrastruktur.

#### **4. Fremtiden**

EDB-modeller vil i fremtiden blive et stadig vigtigere arbejdsredskab i forbindelse med planlægning af jernbanedrift.

I Banestyrelsen rådgivning er det således blevet besluttet, at afdelingskontoret transportplanlægning skal udrustes med en række af de beskrevne modeller. Herved vil det være muligt at løse en lang række nye opgavetyper, som det ikke tidligere har været muligt at løse. Opgaveløsningen vil ligeledes effektiviseres, hvad blandt andet angår kvalitet og tidsforbrug.

En vigtig opgave i forbindelse med anvendelse EDB-modellerne er, at infrastrukturdataene digitaliseres. Dette betyder indledningsvis et stort stykke arbejde. Til gengæld vil det være lettere at komme i gang med et nyt projekt, da alle eksisterende infrastrukturdata er direkte tilgængelige i det nødvendige format. Dette kræver naturligvis, at infrastrukturdata-basen løbende vedligeholdes med de nyeste oplysninger vedr. infrastruktur- og køreplansændringer.

Denne artikel beskriver blot et mindre udvalg af hvilke EDB-modeller, som kan benyttes i forbindelse med planlægningen af jernbanedriften. Der er således ingen tvivl om, at muligheden for fremover i højere grad at inddrage EDB-modeller i forbindelse med jernbaneplanlægning vil være ganske gode.

#### **Litteratur**

- [1] Modernisering af jernbanens hovednet.  
Banepansudvalget - Trafikministeriet april 1997
- [2] Udvikling og praktisk anvendelse af kapacitetsmodel for jernbaner.  
Anders H. Kaas m.fl. trafikdage AUC'96
- [3] SIMU VII - Simulation of railway systems  
IVE/IBS Hannover april 1996
- [4] BAUPLAN - Maintenance site timetable construction system  
IBS Hannover april 1996

- [5] DISPO - Optimal Vehicle Disposition  
IVE/IBS Hannover april 1996
- [6] DYNAMIS - Fahrdynamische Berechnungen beliebiger Zugkonfigurationen  
IVE/IBS Hannover april 1996
- [7] Triebfahrzeugdisposition in großen Netzen  
Alfons Radtke, Jürgen Hörstel, Volker Klahn & Heike Twele  
Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 12 - 1993
- [8] Computergestützte Baubetriebsplanung und -optimierung  
Volker Klahn & Markus Hesselfeld  
Eisenbahningenieur 11 - 1996
- [9] Leistungsfähigkeitsreserven im Eisenbahnverkehr  
Runge & Klahn  
Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 9 - 1991
- [10] Planung eines sehr schnellen Güterverkehrs (ICE-G) auf der Schnellfahrstrecke  
Hannover - Würzburg  
Hörstel, Klahn & Wegel  
Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 1/2 - 1993
- [11] Die Betriebliche Simulation großer Eisenbahnnetze  
Volker Klahn  
Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 10 - 1994
- [12] Interaktive Fahrplankonstruktion mit SIMU VII  
Hörstel, Klahn, Hauptmann  
Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 9 - 1993
- [13] Simulation der S-Bahn Nürnberg  
Klahn, Hartmann, Twele  
Der Nahverkehr 11 - 1995