

## **Simulation af Vejtrafik**

af: Jan Holm, Ph.D., Seniorkonsulent, TetraPlan A/S  
Morten Monrad Pedersen, stud. Ph.D., Mærsk McKinney Møller Inst.for Produktions  
Teknologi.  
Peder Thusgaard Ruhoff, lektor, Mærsk McKinney Møller Inst.for Produktions  
Teknologi.

### ***Formål med projektet:***

Projektet er en del af Transportrådets TRANSFORSK 99 program under temaet byernes trængselsproblemer.

Projektets formål er at opstille en realistisk, operationel simulationsmodel for vejtrafik, der især er dækkende i de situationer, hvor traditionelle trafikmodeller ikke er gyldige, således at man bliver i stand til at foretage konsekvensberegninger på tiltag overfor trængselsproblemer.

Der indledes med et pilotstudium, hvor Cellular Automata (CA) metoden sammenlignes med simulationssystemer fra udlandet.

Den egentlige simulationsudvikling tager udgangspunkt i en eksisterende trafikmodel for Københavnsområdet, hvorfra flest mulig data genanvendes. Med et interface til denne fås et vejnet og en turmatrix at arbejde med.

Dernæst udvikles den egentlige simulationsmodel baseret på erfaringerne fra pilotstudiet. Et praktisk første aftestningsområde er motorvejene omkring København (TRIM-nettet).

De nødvendige supplerende dataindsamlinger foretages for at finde køremønstre, der er typiske for danske forhold og som indgår i simulationsmodellen. Modellen kalibreres endvidere mod data fra TRIM.

Resultaterne fra simulationen visualiseres grafisk.

Samtidig bliver man i stand til at beregne konsekvenser af køproblemer på modelniveau. Det er basalt for udarbejdelse af konsekvensberegninger af informatiksystemer, signalreguleringer, detailprojekteringer af flettestrækninger m.v.

Projektet kører i tre forskellige miljøer: Med én PhD.-studerende tilknyttet Mærsk Mc-Kinney Møller Institut for Produktionsteknologi ved Syddansk Universitet og med én PhD-studerende ved Institut for Matematisk Modellering på Danmarks Tekniske Universitet samt ved ressourcer hos konsulentfirmaet TetraPlan A/S. Det fælles projekt finansieres – ud over ved finansieringen hos de tre organisationer – af Transportrådet samt af Vejdirektoratet. Alle disse parter indgår derfor i en fælles følgegruppe for projektet.

Formålet med projektet er således også at opbygge det faglige vidensniveau hos alle disse organisationer omkring emnet "simulation af vejtrafik".

### ***Problemstilling***

Trafikmodelområdet er inde i en ændringsfase fordi

1. De traditionelle trafikmodeller (ligevægtsmodellerne) er ukorrekte i et overbelastet vejnet, hvor hovedtilstanden er karakteriseret ved køproblemer. Det er situationen i myldretiden på indfaldsveje, på motorringveje og i de indre bydele. Derfor bliver disse dele af vejnettet beskrevet for upræcist af trafikmodellerne, fx når der forekommer chock-bølger med kødannelse, blokeringer ved flettestrækninger og kryds, mix af tunge og lette

køretøjer med forskellige hastigheder, søgetrafik efter parkering, for blot at nævne nogle forhold.

2. Mange af de tiltag, man godt vil have evalueret gennem konsekvens-analyser kræver belysning af den enkelte bils bevægelser, fx:
  - Informatik-projekter som rampedosering og variable skilte for køvarsel/ anbefalet hastighed
  - Bedre design af ramper og flettestrækninger
  - Planlagte hændelser, fx vejarbejder der blokerer vejbanen
  - Dynamisk koordinering af lyssignaler
  - Parkeringsanlægs indflydelse på trafikstrømmene
  - Strategier for busbaners brug og influens på den øvrige trafik.
3. Til brug for trafikantinformation har man behov for udarbejdelse af korttidsprognoser d.v.s. prognoser med tidsrammen 5-30 minutter som følge af ikke-planlagte hændelser, fx uheld.omkring:
  - Afvikling af kødannelser
  - Køretider ad nøglestrækninger.
4. Konsekvenser af færdselslovgivning, fx
  - Lastbilers mulighed for overhaling
  - Fletteregler ved ramper
  - Mix af forskellige køretøjstypers hastighedsgrænser.

*Ligevægtsmodeller utilstrækkelige:*  
*- forkerte i trængselssituationer*  
*- nye projekttyper*

**Figur 1: Problemer ved ligevægtsmodeller.**

Alle disse forhold kan vanskeligt afprøves gennem det nuværende sæt af trafikmodeller. Derfor er der behov for en videreudvikling af disse – en ny generation baseret i langt højere grad på den enkelte bils opførsel i trafikken.

### *Skift i fokus*

For store investeringer har man gennem mange år kunnet beregne effekterne af indgreb i trafiksystemerne, fx ved nye vejanlæg i nyt tracé eller med større kapacitet. Det er sket gennem gængse trafikmodeller. Tilsvarende har man kunnet beregne effekterne af nye kollektive anlæg som metrolinier, baneanlæg, buslinier.

Nu er fokus skiftet fra vejbygning og andre anlæg til en bedre udnyttelse af de forhåndenværende veje og anlæg. Disciplinen trafikinformatik er opstået som konsekvens og den har affødt et behov for nye modelværktøjer.

Betragtelige investeringer er foretaget i systemer for

- trafikregulering (variable skilte for hastighedsharmonisering, - for kødannelser, - med alternative ruter,...)
- prioritering af busser.
- enkelte signalanlægs opbygning og deres koordinering i et net
- parkeringsanlæg omkring centre
- trafiksaneringer (vejlukninger, ensretninger, stillegader..)

***Tendenser:***

- <i>Nyanlæg</i>	->	<i>Bedre udnyttelse af eksisterende</i>
- <i>Langtidsprognoser</i>	->	<i>Korttidsprognoser</i>
- <i>Statiske modeller</i>	->	<i>Dynamiske modeller</i>
- <i>Ligevægtsmodeller</i>	->	<i>Simulationsmodeller</i>

**Figur 2: Skift af fokus.**

For hver af disse projekttyper kan det nu økonomisk forsvares på forhånd at beregne effekter fx. i form af benzinforsbrug, forurening og støj. Det med udgangspunkt i en dynamisk trafikbeskrivelse i modsætning til en statisk beskrivelse.

Andre årsager til, at det nu er muligt at foretage effektberegninger på sådanne investeringer, er bl.a.:

- at regnekraften på edb-maskinerne har gjort det tidsmæssigt og økonomisk realistisk at foretage sådanne beregninger selv på PC'ere
- at datamaterialet nu foreligger tidsmæssigt detaljeret nok fra allerede implementerede trafikinformatiksystemer
- at datakravene for modelopstilling (af vejnet og af turmatricer) er blevet mindre, da de statiske trafikmodeller er videreudviklede til et detaljeringsniveau, der muliggør halvautomatisk modelopstilling af simulationsmodeller.

I Danmark har der indtil nu ikke været stor interesse for simulation af vejtrafik, hverken fra videnskabeligt eller praktisk hold. Dette er meget ulig situationen i det øvrige Europa.

Dette TRANSFORSK projekt søger at opbygge en dansk vidensbaggrund for "simulation af vejtrafik".

### ***Forskellige modeltyper***

Omkring simulationsmodeller er der udviklet forskellige modeltyper:

1. Ved analogier til kinetisk flow teori hvor sammenhængen mellem tæthed, hastighed og trafikmængde er beskrevet ved 2. ordens differentialligninger.
2. Ved en beskrivelse af den enkelte bils bevægelse ved en 2.ordens differential ligning.
3. Ved Cellular Automata modeller hvor bilers bevægelse beskrives diskretiseret ved hop mellem celler.

Sammenligninger har vist [7] at

- for trafikberegninger på store net og korttidsprognoser (½-1 time) er Cellular Automata metoden mest velegnet. Dette skyldes dennes kortere beregningstid og få parametre.
- ønsker man bedre præcision skal man benytte modeltype 2 hvor den enkelte bils bevægelse følges. Denne anbefales for kontrol af variable skilte eller kortere prognoser (5-15 min).
- ønsker man endnu højere præcision fx om den enkelte kø's opståen og afvikling viser modeltype 1 baseret på flowligninger at være den bedste.

Det efterfølgende beskriver modeltypen Cellular Automata mere i dybden.

### **Cellular Automata modellen**

Som nævnt har dette projekt indtil videre anvendt en Cellular Automata model, nærmere bestemt er det den såkaldte Nagel-Schreckenberg (N-S) model. Der er tale om en simpel model, hvilket tillader simuleringer, der kører meget hurtigere end real-time (naturligvis afhængigt af vejsystemets størrelse).

I cellular automata modellen opdeles vejstrækningerne i en række celler, der typisk har en længde på 7,5 meter (en længde der er valgt ved at se, hvor tæt biler i gennemsnit holder, når der er kødannelse) og en bredde på en vognbane. Hver af disse celler kan enten være tom eller indeholde en bil.

Udover diskretisering af vejene til celler, diskretiserer N-S modellen også tiden. Der arbejdes i tidsskridt, der sædvanligvis har længde på et sekund. Biler kører med hastigheder, der er et heltalligt antal celler pr. tidsskridt, dvs. de mulige hastigheder er et multiplum af  $7,5 \frac{m}{s} = 27 \frac{km}{t}$ , og bilerne har en maksimal hastighed  $v_{max}$ .

### **Den grundlæggende N-S model**

Den oprindelige N-S model omhandler kun veje med en enkelt vognbane. Bilerne på vejen nummereres fra 1 til  $n$  i kørselsretningen. Lad  $v_i(t)$  angive den hastighed som bil  $i$  kører med i tidsskridt  $t$ , lad  $g_i(t)$  angive antallet af tomme celler mellem bil  $i$  og  $i+1$  ligeledes i tidsskridt  $t$ , og lad endvidere  $p_{noise} \in [0,1]$ .

I starten af tidsskridt  $t$  er bil  $i$  i celle  $x_i(t)$ , og den skal nu vælge sin hastighed  $v_i(t)$ . Alle biler foretager dette valg parallelt, hvorefter de alle flyttes ifølge deres valgte hastighed. Dette gøres med følgende regler (reglerne er taget fra [1]):

1. *Acceleration:*  $v_i(t) = \min(v_i(t-1) + 1, v_{max})$ .
2. *Undgå kollisioner:*  $v_i(t) = \min(v_i(t), g_i(t))$ .
3. *Tilfældighed:* Med sandsynlighed  $p_{noise}$  lad  $v_i(t) = \max(v_i(t) - 1, 0)$ .
4. *Bevægelse:*  $x_i(t) = x_i(t-1) + v_i(t)$

Regel 1 udtrykker bilisternes ønske om at køre med deres maksimale hastighed.

Regel 2 sørger for, at biler ikke kolliderer ved (om nødvendigt) at nedsætte hastigheden til antallet af tomme felter mellem en bil og den umiddelbart forankørende

Regel 3 introducerer et element af tilfældighed i modellen, som en meget simpel repræsentation af forskellig bilistadfærd og variationer i eksterne faktorer.

Endeligt foretager regel 4 den egentlige bevægelse af bilerne.

Det er naturligvis ikke nok at have regler, der kan flytte biler, der skal også indsættes nye biler. Dette gøres ofte ved at indsætte biler i den første celle efter en given fordeling.

Som en variation af de ovenstående regler har vi tilladt bilerne at have en individuel maksimal hastighed, der kan være 3, 4 eller 5 celler pr. sekund, dvs.  $81 \frac{km}{t}$ ,  $108 \frac{km}{t}$  eller  $135 \frac{km}{t}$ .

### **Flersporede veje**

For at gøre N-S modellen brugbar til simulering af motorveje skal den naturligvis kunne håndtere flere vognbaner, og til det formål findes der flere forskellige regelsæt (se f.eks. [6]). De regler, vi bruger, er en variation af eksisterende regler, og den anvendte notation er forklaret i nedenstående tabel.

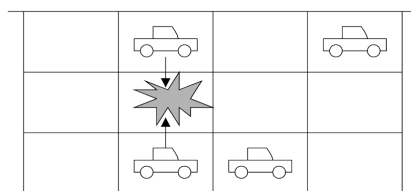
Variabel	Forklaring
$g_i^{l+}(t)$	Antallet af tomme celler mellem bil $i$ og bilen umiddelbart foran den i vognbanen til venstre for bilen selv i tidskridt $t$ .
$g_i^{l-}(t)$	Antallet af tomme celler mellem bil $i$ og bilen umiddelbart bagved den i vognbanen til venstre for bilen selv i tidskridt $t$ .
$g_i^{+}(t)$	Antallet af tomme celler mellem bil $i$ og bilen umiddelbart foran den i den samme vognbane i tidskridt $t$ .
$g_i^{-}(t)$	Antallet af tomme celler mellem bil $i$ og bilen umiddelbart bagved den i samme vognbane i tidskridt $t$ .
$g_i^{h+}(t)$	Antallet af tomme celler mellem bil $i$ og bilen umiddelbart foran den i vognbanen til højre for bilen selv i tidskridt $t$ .
$g_i^{h-}(t)$	Antallet af tomme celler mellem bil $i$ og bilen umiddelbart bagved den i vognbanen til højre for bilen selv i tidskridt $t$ .
$l_i(t)$	Den vognbane bilen kører i i tidsskridt $t$ . Vognbanerne er nummereret 1,2,... fra højre mod venstre (relativt til kørselsretningen).
$d_i(t)$	Den vognbane som bilisten gerne vil benytte i tidsskridt $t$ . Den kaldes den <i>ønskede vognbane</i> og vælges under tidsskridt $t-1$ .

Ideen bag notationen er, at "v" angiver vognbanen til venstre for bilen, og "h" angiver vognbanen til højre for bilen. Hvis der hverken er et "v" eller et "h", så drejer det sig om mellemrum i bilens egen vognbane. Tilsvarende repræsenterer "+" mellemrummet foran bilen og "-" angiver mellemrummet bag den. Bemærk iøvrigt, at hvis der er en bil i cellen ved siden af den aktuelle bil, så regnes mellemrummene i det pågældende spor for at være nul.

Reglerne er:

1. *Overvej højre vognbane:* Hvis  $g_i^{h-}(t) \geq v_{\max}$  og  $g_i^{h+}(t) \geq v_{\max}$  eller  $g_i^{h+}(t) \geq g_i^{+}(t)$  så  $d_i(t+1) = l_i(t) - 1$ , ellers  $d_i(t+1) = l_i(t)$ .
2. *Overvej venstre vognbane:* Hvis  $g_i^{v-}(t) \geq v_{\max}$  og  $(g_i^{+}(t) < \min(v_i(t)+1, v_{\max}))$  eller  $v_i(t) = 0$  og  $g_i^{+}(t) < g_i^{v+}(t)$  og  $g_i^{h+}(t) < g_i^{v+}(t)$  så  $d_i(t+1) = l_i(t) + 1$ .
3. *Vognbaneskift:* Lad om muligt  $l_i(t+1) = d_i(t+1)$ . Håndter evt. vognbanerne en efter en fra højre mod venstre for at undgå kollisioner.

Regel 5 rykker bilisten ind i den højre vognbane, hvis det ikke giver vedkommende nogen umiddelbare problemer.



**Figur 3: Illustration af en mulig kollision i vognbaneskiftfasen, der kan forhindres ved at behandle vognbanerne en af gangen.**

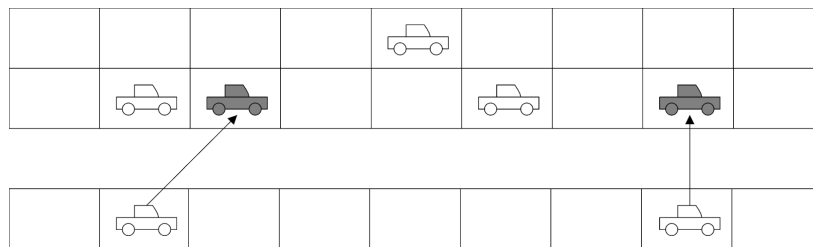
Regel 6 simulerer det faktum, at en bilist kun bør vælge den venstre vognbane, hvis den er "bedre" end den aktuelle og den til højre, og hvis vedkommende ønsker at køre hurtigere. Endelig udfører regel 7 vognbaneskift og sørger for, at der ikke forekommer nogen kollisioner (på en vej med tre eller flere vognbaner kan det ske, at to bilister begge vælger at skifte til den samme position i vognbanen mellem dem --- dette er illustreret i figur 3).

## Tilkørsler

I øjeblikket fokuserer vi mest på motorvejstilkørsler, og disse kan repræsenteres på forskellige måder i N-S modellen. Et eksempel herpå findes i [2], hvor hver tilkørsel repræsenteres af en enkelt speciel celle på motorvejen, hvor der i hvert tidsskridt med en hvis sandsynlighed indsættes en ny bil. Fordelen ved denne regel er, at den koster meget lidt computertid i simuleringen. Til gengæld inkluderer den ikke de fænomener, der opstår, når en bilist på en motorvej tager hensyn til biler på en tilkørsel ved at gøre plads til dem, inden de kommer ind på motorvejen. Denne effekt er specielt vigtig i et land som Danmark, hvor loven tilsiger, at man skal gøre plads til tilkørende, men selv i lande, der ikke har en sådan lov, kan effekten iagttages (se [3]).

For at inkludere denne effekt i simuleringen har vi implementeret et par forskellige modelleringer af tilkørsler i JCATS programmet, og fælles for disse er de såkaldte *skyggebiler*.

Når en bil kører på en tilkørsel, placeres en skyggebil i en celle i den inderste vognbane på motorvejen ud for det sted på tilkørslen, hvor bilen kører. Skyggebiler behandles ikke som almindelige biler, de er der kun med for at gøre bilisterne på motorvejen opmærksomme på tilstedeværelsen af biler på tilkørslen. Det er så op til bilisterne på motorvejen at afgøre, om de vil ignorere skyggebilerne eller ej. Indsættelse af skyggebiler er illustreret i figur 4.



**Figur 4: Illustration af placering af skyggebiler på en motorvej. Det øverste gitter repræsenterer motorvejen, og det nederste repræsenterer tilkørslen. De grå biler er skyggebiler, som observeres af bilisterne på motorvejen.**

Vi vil nu kort beskrive ideerne bag et af regelsættene for bilistadfærd omkring og på tilkørsler, af pladshensyn vil detaljerne blive udeladt (de vil blive præsenteret i en senere artikel).

Hver skyggebil tildeles en prioritet, der bliver større, jo tættere den tilhørende rigtige bil kommer på tilkørsels afslutning. Jo højere prioritet en skyggebil har, jo større er chancen for, at bilisterne på motorvejen tager hensyn til den. Når en bilist har valgt at tage hensyn til en skyggebil, bliver han ved med at tage hensyn til dem, indtil vedkommende ikke har set en skyggebil i et antal sekunder. Dette gøres for at undgå hurtigt skiftende adfærd.

Når en bilist har besluttet at tage hensyn til en skyggebil, så vil vedkommende prøve at sætte hastigheden lidt ned, hvis den er så tæt på, at den nås i næste tidsskridt, med mindre dette bringer bilistens hastighed ned under en given grænseværdi.

Skyggebiler påvirker også vognbanevalg. Hvis en bilist vælger at tage hensyn til en skyggebil, vil skyggebilen blive regnet som en almindelig bil i forbindelse med vognbanevalg. Når en bilist på en tilkørsel skal vælge om vedkommende vil bevæge sig ind på motorvejen, bruges prioriteten af dennes skyggebil divideret med to faktorer, der afhænger af hhv. forskellen mellem afstanden til den nærmeste bil bagved på motorvejen og dennes hastighed, og forskellen mellem afstanden frem til den nærmeste forankørende bil på motorvejen og bilens egen hastighed. Den herved beregnede værdi bruges som sandsynlighed for, at bilisten vil bevæge sig ind på motorvejen.

## Resultater

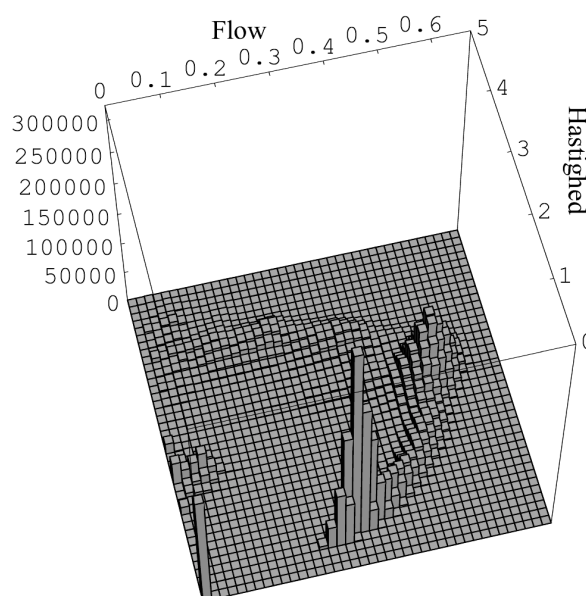
JCATS programmet er for nyligt nået til et punkt, hvor det kan producere brugbare resultater, og vi har kun nået at betragte resultaterne på fænomenniveau. Vi vil her give en *meget* kort

præsentation af nogle resultater, der viser, at vores model er i stand til at reproducere forskellige fænomener fra rigtig trafik, og der arbejdes i øjeblikket på en artikel, der gennemgår de opnåede resultater mere grundigt.

Vi har bl.a. foretaget en kørsel med en simulation af en tosporet motorvej, der var 2500 celler lang (18,75 km) og havde tre tilkørsler, hvor biler blev indsat med stadig større hyppighed, indtil der var totalt nedbrud af trafikken. For hver celle på vejen blev der for hvert tidsskridt målt gennemsnitshastighed og tæthed. Disse værdier blev midlet over cellen selv og hundrede celler på hver side af den og endvidere midlet over de to vognbaner. Yderligere er det gennemsnitlige flow blevet bestemt som gennemsnitshastighed gange tæthed.

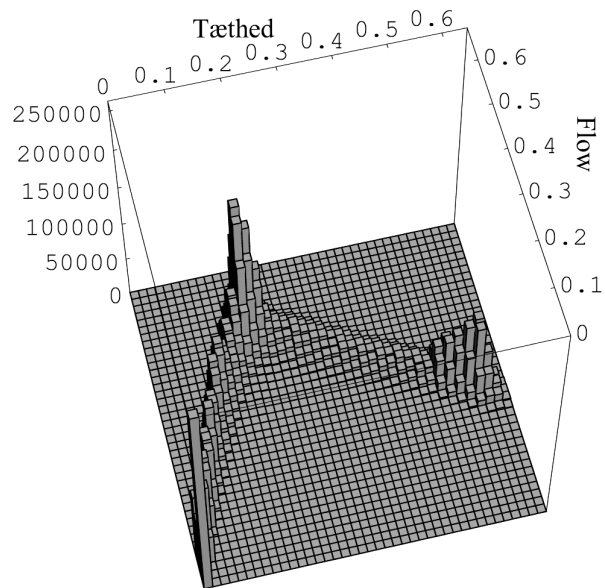
I figur 5 er flowet afbildet som funktion af gennemsnitshastigheden. Denne figur stemmer ganske godt overens med virkelige data, som f.eks. dem i [4] og [6]. Kurverne, der blev opnået ved disse målinger, ligner figur 5 ganske godt.

Udover at sammenligne med virkelige data, kan man f.eks. sammenligne med det idealiserede kapacitetsdiagram på side 91 i [5], og det ses her, at de to kurver har samme form.



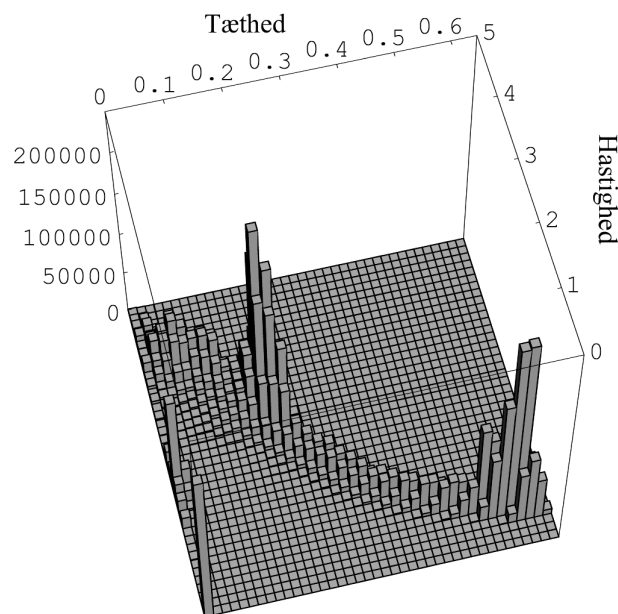
**Figur 5: Histogram over antal af observationer af et flow-hastighed datapar. Flow er antallet af biler, der i passerer en celle pr. tidsskridt, og hastighed er celler pr. sekund**

Figur 6 viser flowet afbildet som funktion af tætheden, og også her stemmer den med simulatorens opnåede kurve godt overens med de virkelige observationer i [6].



**Figur 6: Histogram over antal af observationer af flow-tæthed datapar. Flow angives i antallet af biler, der i gennemsnit passerer en celle pr. tidsskridt, og tæthed angiver antallet af biler pr. celle.**

Tilsvarende ser vi i figur 7, der afbilder hastighed som en funktion af tæthed, en ganske god overensstemmelse med den tilsvarende "real-life" kurve i [6].



**Figur 7: Histogram over antal af observationer af tæthed-hastighed datapar. Tæthed er antallet af biler pr. celle, og hastigheden har enheden celler pr. sekund.**

Udover de tre omtalte kurver har vi f.eks. lavet plots over tæthed som funktion af sted og tid og observeret forskellige former for bølgebevægelser, f.eks. bølger af høj tæthed, der



bevæger sig mod kørselsretningen (de såkaldte shock waves). vi har også mere kvalitativt observeret, at bilister på en simuleret motorvej, som ønsket, prøver at gøre plads til biler, der kommer fra tilkørsler.

### ***Konklusion***

Som beskrevet er JCATS programmet i stand til at simulere motorveje med tilkørsler og levere nogle resultater, der (i hvert fald på overordnet niveau) stemmer ganske godt overens med virkelige observationer.

Den ovenfor beskrevne simulationskørsel (med over 38 vognbanekilometer) kan afvikles omkring 140 gange hurtigere end real-time på en 800 MHz Pentium III PC, på trods af, at JCATS programmet er skrevet meget modulært, hvilket let kan gå udover hastigheden.

I fremtiden skal simulatoren udvides til at understøtte flere typer af vejsegmenter, og vi planlægger at sammenligne simulationsresultater med data fra TRIM spolerne, der ligger nedgravet i motorvejene omkring København.

I øjeblikket arbejdes der på en mere grundig artikel omkring simuleringen af motorvejtilkørsler.

### ***Litteratur***

- [1] K. Nagel & M. Schreckenberg, A Cellular Automaton for Freeway Traffic, *J. Phys. I France* **2**, 2221-2229 (1992).
- [2] E. G. Campari & G. Levi, A Cellular Automata Model for Highway Traffic, *The European Physical Journal B* **17**, 159--166 (2000).
- [3] M. Aa. Nielsen & R. Rysgaard, Merging Contra Give Way When Entering a Motorway, *The Danish Road Directorate* (1995).
- [4] M. Rickert, P. Wagner & Ch. Gawron, Real-Time Traffic Simulation of the German Autobahn Network, *Proceedings of the 4th PASA Workshop*, (1996).
- [5] H. Lahrmann & S. Leleur (redaktører), *Vejtrafik: Trafikteknik og Trafikplanlægning*, Polyteknisk Forlag, (1997).
- [6] K. Nagel, D. E. Wolf, P. Wagner & P. Simon, Two-Lane Traffic Rules for Cellular Automata: A Systematic Approach, *Physical Review E* **58**, **2**, 1425--1437 (1998).
- [7] P.Kamhäuser, M.Glatz: "Investigation of the Suitability of Different Highway Traffic Models" in *Proceedings from World Congress on ITS, Torino 2000*.