

Trafiksimulering med VISSIM

- En analyse af programmets grundlæggende adfærdsparametre samt bestemmelse og test af adfærdsparametre under danske forhold.

Af: Anders Greve Pihlkjær

Dette paper er baseret på et afgangsprøveprojekt udarbejdet i foråret 2009 som en del af civilingeniøruddannelsen indenfor Vej- og Trafikteknik på Aalborg Universitet.

Afgangsprøveprojektet, har til formål at teste og kalibrere simuleringsprogrammet VISSIM til danske forhold. Den første del af rapporten omhandler en statistisk og virkelig sammenligning af den tyske og danske trafikantadfærd. Gennem markundersøgelser i Nordjylland er der indsamlet data, som herefter analyseres og testes i VISSIM. Resultaterne af disse tests viser, at der overvejende er forskel på anvendelsen af tysk og dansk trafikantadfærd ved frit flow, mens at rejsetiden gennem virkelige modeller i flere tilfælde ikke forøges betydeligt.

Den anden del af rapporten behandler kalibreringen af en flettestrækning, som går fra tre til to spor på en nordjysk motorvej. Gennem indsamling af data på motorvejen nord for Limfjordstunnelen i Aalborg er der opstillet grafer over hastighed og trafikmængder, som benyttes i kalibreringsprocessen. Der benyttes blandt andet GPS-data, videooptagelser, hastigheds-målinger og trafiktællinger samt statistisk data til at opnå den nødvendige kalibrering.

Resultaterne fra kalibreringen viser, at det er muligt at opnå en korrekt trafikafvikling ved at hæve aggressiviteten for bilisterne. Derudover viser det sig, at VISSIM ikke kan afbilde trafikafvikling i en spidstime uden intelligent fartilpasning. Det kan derfor konkluderes, at VISSIM kun kan afvikle trafikken hensigtsmæssigt, med et indgående kendskab til trafikens variationer i den simulerede periode.

Begrebsforklaring

- **VISSIM:** Navnet på det mikrosimuleringssoftware, som benyttes i projektet.
- **Bilens parametre/problemstillinger:** De parametre/fordelinger, som styrer bilens grundlæggende egenskaber såsom hastighedsfordeling, accelerationsfordeling, decelerations-fordeling, vægt- og kraftfordeling. Disse parametre antager ikke bestemte værdier og kan måles gennem markforsøg eller fra dataindsamling.
- **Adfærdsparametre/problemstillinger:** De parametre, som styrer bilistens adfærd ved for eksempel forfølgelse og fletning. Parametrene antager en konstant værdi, som defineres af brugeren. Adfærdsparametrene er knyttet til problemstillingen omkring flettekalibreringen.
- **VISSIM-fordelinger:** De fordelinger, der ligger som standard i VISSIM.
- **Mark-/GPS-fordelinger:** De fordelinger, som er lavet på baggrund af dataindsamling.

Indledning

Gennem de sidste 40 år er trafikken vokset kraftigt på de danske veje. Et resultat af denne trafikale vækst har været en forøget efterspørgsel på større kapacitet samt flere veje i Danmark. Denne efterspørgsel har gennem årene medført massive infrastrukturudvidelser, som ofte kræver nøje planlægning, modellering og simulering.

Det har været et stort problem i mange år, at vejnettets kapacitet hurtigt opbruges med trængslen til følge. Politikerne og trafikforskerne har længe indset at udbygning af vejsystemet ikke alene kan følge med udviklingen på vejnettet. For at imødekomme væksten er det også nødvendigt at optimere de eksisterende systemer og dermed skabe plads til de mange biler. En grundlæggende forudsætning for optimering er at lave modeller og prognoser, som er med til at udforske og vælge den bedste optimeringsløsning. Det er derfor på grund af trængslen og de mange kødannelser, at kravet om trafikplanlægning og trafikmodeller er opstået. Trafikmodeller og prognoser er imidlertid oftest estimeret på et tværsnit i tid og er derfor mest velegnede til kortsigtede planer. Derudover er disse planlægningsmetoder ofte baseret på antagelser om bestemte udviklingsforløb, som er en markant svaghed. Disse ydre faktorer er eksempelvis [Rørbech 2008, p.6]:

- Vækst kontra stagnation.
- Teknologispring kontra fortsat brug af eksisterende.
- Rigelig energi kontra mangel på energi.
- Høj miljøbevidsthed kontra lav miljøbevidsthed.
- Bil kontra kollektiv trafik.
- Central udvikling fokuseret omkring hovedstadsområdet og de store byer kontra regionalisering.

Et godt eksempel på denne kompleksiteten er, hvis der udvælges to forskellige vækstmodeller med hhv. lav og høj udvikling. I dette tilfælde vil en given udvikling kunne udfolde sig $26 = 64$ senarier/kombinationsmuligheder, hvilket kan være svært at gennemskue. Eksempelvis lavede trafikforskerne i 1970'erne fejlestimeringer på trafikudviklingen, da energikriserne ramte os. Gennem 1960'erne var bilismen nærmest eksploderet, hvilket dengang var grundlaget for fremtidens trafikale senarier og prognoser. Men i 1973 og senere i 1978 led bilismens massive udvikling et markant knæk, hvilket ingen havde regnet med. Energikrisen medførte imidlertid, at alle prognoser og modeller skulle justeres til de nye vilkår, så Danmark ville få en mere realistisk infrastrukturudvikling [Lahrmann 2008].

Trods kompleksiteten og fejlestimeringer i modellerne har det dog vist sig fornuftigt at planlægge trafikken for at undgå trængsel og kø på de danske veje. Der har gennem tiderne været mange trafikmodeller, som har forsøgt at give svar på fremtiden med større eller mindre præcision. Resultaterne har ofte været begrænsede, blandt andet på grund af de utallige menneskelige og fysiske parametre, der påvirker en sådan modellering, samt behandling af store datamængder,

som kræver stor processorkraft. Derudover bliver det danske vejnet hele tiden større og mere komplekst, og det er dermed tilsvarende sværere at lave detaljerede og korrekte trafikale analyser. Tilmed skal der i dag tages højde for den nyeste ITS-teknologi, der langsomt bliver implementeret både i bilerne, i trafikstyringssystemerne og på vejen, hvilket igen ændrer planlægningsgrundlaget.

Til stor glæde for trafikplanlæggere har computerens processorkraft oplevet en kraftig vækst i de seneste år. Dette har gjort det muligt at behandle store mængder data hurtigere og mere effektivt. Derudover har computerteknologien medført nye og bedre trafikmodeller, der hele tiden implementerer flere og mere komplekse elementer fra trafikken. Eksempelvis er det i dag muligt at kombinere bus, lastbiler, personbiler, bløde trafikanter, jernbane og undergrundsbane i samme simulering, hvilket giver et bedre billede af den reelle symbiose, der findes i trafikken.

På Karlsruhe universitet i Tyskland er der i de sidste mange år blevet forsket i trafikantadfærd på flere planlægningsniveauer, herunder specielt mikroniveau. De mange års forskning, samt kravet om mere stabile og sikre trafikmodeller, medførte imidlertid i 1979, at Dr.-Ing. Hans Hubschneider stiftede PTV Planungsbüro Transport und Verkehr. Hans mission var at implementere de mange års forskning i et moderne mikrosimuleringsprogram, som i 1993 blev udgivet som softwaren VISSIM - Verkehr In Städten - SIMulationsmodell [Wikipedia 2009a]. De mange års tysk forskning er således blevet implementeret i VISSIM, hvilket har gjort, at VISSIM har udviklet sig til et meget komplekst program med et større antal parametre og indstillingsmuligheder. I takt med at kompleksiteten i programmet er blevet større, er der således også kommet flere problemstillinger omkring de parametre, som styrer VISSIM.

Mikrosimuleringsprogrammerne har efterhånden indtaget en førende plads hos rådgiverne og planlæggerne, og de bliver dagligt anvendt i infrastrukturplanlægningen samt til analyse og evaluering af trafikale situationer. Det er således billigere og mindre tidskrævende at afprøve teorier og design i mikrosimuleringsmodellerne. Anvendelsesmulighederne er mange, og der kan blandt andet nævnes anvendelse inden for: [PTV-AG 2008, p.53-57]

- Test af nye vejudformninger.
- Optimering af lyskryds.
- Fremtidsstudier af eksisterende og nye trafikløsninger.
- ITS systemer (fx intelligent cruise control og dets effekt).
- Analyse af bevægelsesmønstre i befolkningen.

Afgrænsning

VISSIM er et software, med stor gennemsigtighed for brugeren, og brugergrænsefladen giver høj mulighed for at justere og påvirke trafikken. Overordnet er VISSIM bygget op omkring en

række hovedområder, hvor de vigtigste er hhv. vejnettets geometri, signalernes indstilling og bilisternes individuelle adfærd. Inden for hvert af disse hovedområder er der justerbare parametre, som gør det muligt for brugeren at påvirke trafikafviklingen i VISSIM.

Flere af de parametre, som ligger inden for disse hovedområder, er meget komplekse og næsten umulige at måle i virkeligheden. I stedet må brugeren sætte sin lid til programmets standardindstillinger, hvilket kan medføre upræcise simuleringer. Problemet ved disse standardindstillinger er, at de er udviklet i Tyskland og dermed i mange tilfælde også er bedst egnet til at simulere tyske forhold. Praksis har vist, at de ofte ikke har været tilstrækkeligt præcise, når der skal simuleres på det danske netværk. Derfor kan brugeren risikere, at der ved ukritisk brug af standardindstillingerne sker en skævvridning af virkeligheden.

Der er således ikke klare anvisninger for, hvorledes parametrene i VISSIM bør indstilles, således at simuleringsmodellerne bedst muligt afspejler danske trafikale forhold. Dette projekt vil gennem analyse af VISSIM og markforsøg arbejde med anbefalinger til danske retningslinjer for indstillingen af parametrene i VISSIM. Dette med henblik på brug under danske motorvejsforhold. Målene for denne rapport er således:

- At undersøge om dansk trafikadfærd er forskellig fra den tyske. Denne undersøgelse baseres på en statistisk analyse af trafikadfærden i VISSIM ved frit flow. Der vil desuden være en test af rejsetiden i en virkelig trafikmodel for at se den reelle påvirkning af ændringerne.
- At kalibrere VISSIM til en lokal flettestrækning i eftermiddagsspidstimen ved Limfjordstunnellen for dermed at opnå den bedste parameterindstilling til danske fletteforhold.
- At anwise en videnskabelig kalibreringsmetode, som kan benyttes til andre kalibreringsprojekter.

Gennem dette paper vil de undersøgelser, der knytter sig til delmål no. 1, blive refereret til som "bilens parametre/problemstillinger". Dette gøres, da undersøgelserne behandler bilens egenskaber, som kan måles og registreres ved markforsøg. Her tænkes specielt på forhold som hastighedsfordelinger, de- og accelerationsfordelinger m.fl.

Der vil efterfølgende blive refereret til undersøgelserne til delmål no. 2, som adfærdsparete/problemstillinger, da disse undersøgelser behandler parameterindstillinger, som ikke direkte kan måles i marken. Nærmere forklaring herom følger i senere kapitler.

Bilens parameter

En række af parametrene i VISSIM er indlagt som fordelinger frem for definerede værdier. Da disse fordelinger har stor indflydelse på trafikafviklingen, er store datamængder nødvendigt for at kunne give et præcist billede af den danske trafikantadfærd. Derfor er der i høj grad forsøgt at

indsamle data fra offentlige instanser, som har lavet registreringer over større perioder. Skulle data ikke være tilgængelige, er der indsamlet data gennem markobservationer.

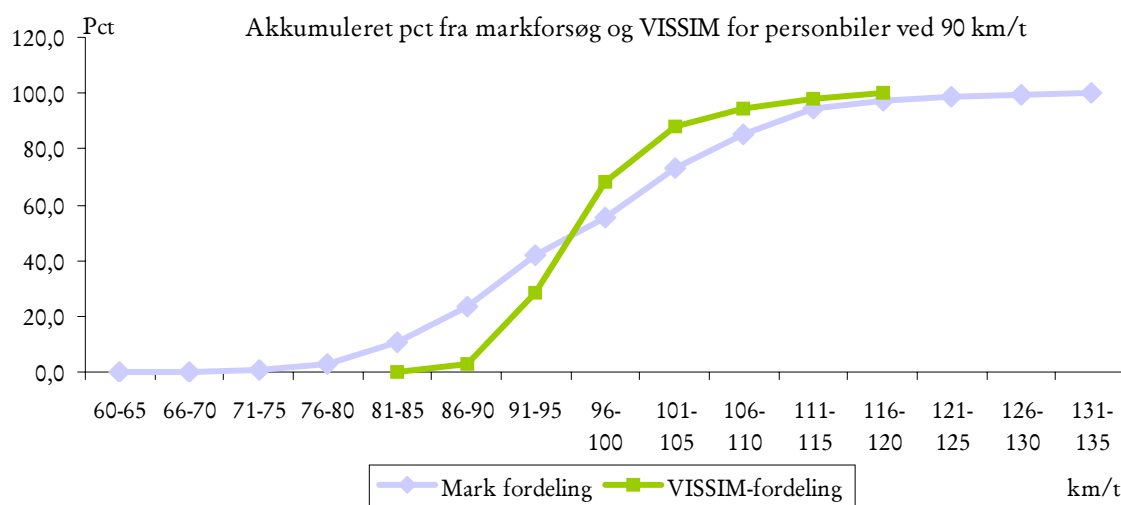
Hastighedsfordelinger på motorveje

Hastighedsfordelingerne er vigtige parametre i VISSIM, da de har indflydelse på kapaciteten, rejsetiden og mulig rejsehastighed. Med mindre bilisten er forhindret af andre faktorer, vil bilisten antage en ønsket hastighed, der er bestemt ud fra en brugerdefineret fordeling i VISSIM. VISSIM indeholder som standard nogle fordelinger for hastighedsprofiler, som afspejler alle trafikale situationer og køretøjstyper. Når brugeren laver et netværk i VISSIM, skal der knyttes en fordeling til alle køretøjerne i modellen.

Eftersom hastighedsfordelingerne er lavet efter tyske standarder, er det endvidere interessant at undersøge, om fordelingerne er tilsvarende i Danmark. Derudover er det også interessant at se, hvilken indflydelse en ændring i disse fordelinger har på trafikafviklingen i VISSIM. Der undersøges dermed følgende:

- Den danske hastighedsfordeling ved 90 km/t for personbiler.
- Den danske hastighedsfordeling ved 110 km/t for personbiler.
- Den danske hastighedsfordeling ved 80 km/t for lastbiler.
- Indflydelsen af ændring af ovenstående hastighedsfordelinger fra standard-fordelingerne til fordelinger fra markobservationer.

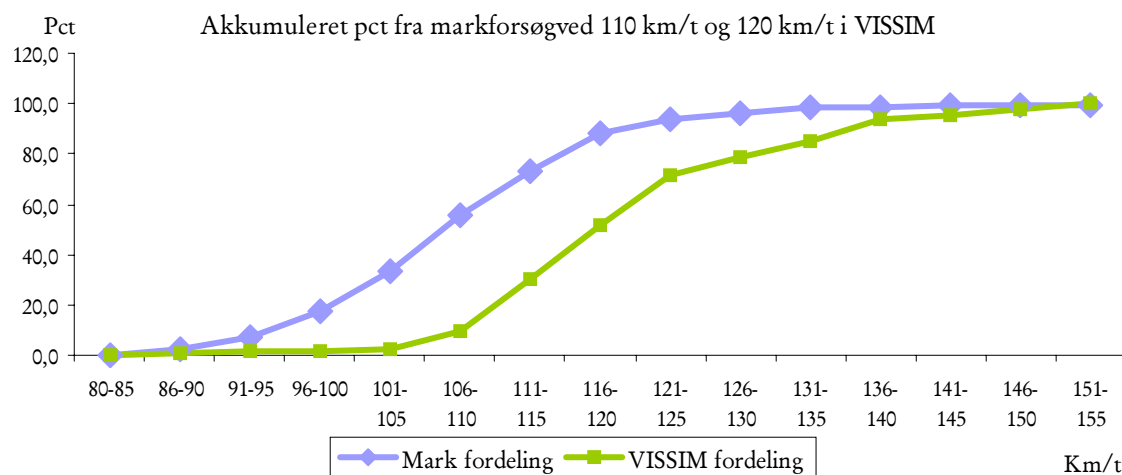
For at vise forskellen mellem hastighedsfordelingen i VISSIM (standardfordelingerne) og markfordelingerne er det lavet en visuel illustration. Standard- og markfordelingerne er konstrueret ved at indsamle hastighedsdata fra kørsler i VISSIM. Det vil sige, at fordelingerne ikke er hentet direkte fra programmet, hvilket betyder, at sammenligningsgrundlaget er ens. På Figur 6.10 ses sammenligningen af markfordelingerne og standardfordelingerne ved en 90 km/t hastighedszone. Begge kurver viser data fra kørsler i VISSIM med ca. 1000 biler. Det høje antal



Figur 6.10 Sammenligning med markforsøg og VISSIM fordeling ved 90 km/t

biler i VISSIM er med til at sikre, at det er den reelle hastighedsfordeling, der er illustreret, og ikke den teoretiske. Sammenligningen mellem marktællingerne og standard-fordelingerne viser, at markforsøgene har markant lavere hastighed end VISSIM- bilerne. Dog ses det, at kurverne ved 100 km/t indtager samme form.

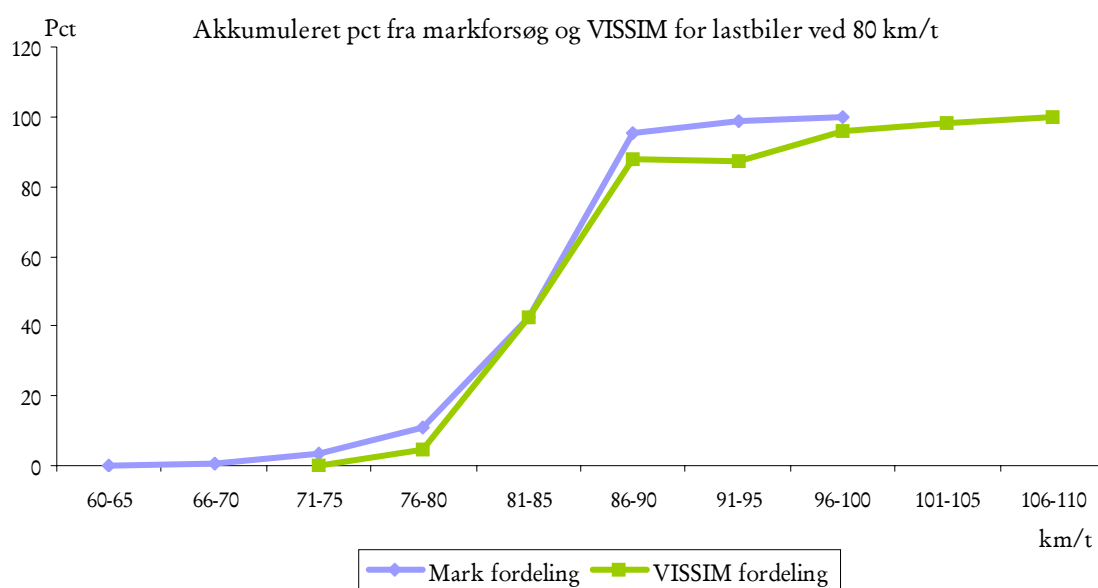
På Figur 6.11 ses en sammenligning af markfordelingerne og standardfordelingerne ved en 110 km/t hastighedszone. Da der i VISSIM ikke er defineret en 110 km/t fordeling, vælges der at



Figur 6.11: Sammenligning med markforsøg ved 110 km/t og 120 km/t for VISSIM-fordelinger sammenligne en 120 km/t fordeling, eftersom denne afspejler markfordelingen bedst

Fordelingen viser en markant forskel mellem mark- og standardfordelingerne med op til 25 % ved enkelte hastigheder. Grundlæggende kan der ses ud fra kurverne, at de danske bilister kører væsentligt langsommere end de tyske bilister.

På Figur 6.12 ses en sammenligning af hastighedsfordelingerne for lastbiler ved en hastighedsgrænse på 110 km/t. Umiddelbart ses det, at de to kurver følger hinanden, men mark-fordelingen



Figur 6.12: Sammenligning med markm-linger og VISSIM-fordelinger ved 80 km/t for lastbiler

har en maksimal og minimal grænse på hhv. 95 km/t og 66 km/t. For standardfordelingen ligger minimum på 71 km/t og maksimum på 110 km/t. Da lastbiler i Danmark ikke kan køre over 90 km/t, er denne kurve ikke repræsentativ for danske fordelinger.

Efterfølgende er det nødvendigt at teste, om en ændring i disse fordelinger har en indflydelse på trafikafviklingen i VISSIM. Indledende bliver der redegjort for opsætningen i VISSIM samt den statistiske analysemetode.

Resultater

Ud fra graferne over hastighedsfordelinger ses det, at der generelt er forskel på hastighedsfordelingerne fra VISSIM til markobservationerne. Graferne viser, at tyskerne typisk kører hurtigere end danskerne i de samme hastighedszoner. Dette er specielt markant i zonen for 110 km/t. Dette må være et resultat af, at tyskerne har større biler, og konsekvensen af lovovertrædelser er ikke nær så alvorlig i Tyskland, som den er i Danmark. En anden væsentlig forskel ses ved hastighedsfordelingerne for lastbiler, hvor der i Danmark er hastighedsspærre i lastbilerne. Dermed kan lastbilerne ikke køre så hurtigt som fordelingen i VISSIM. Hermed kan det konkluderes, at det ikke er realistisk at benytte de tyske fordelinger for alle køretøjer i danske simuleringer. Det skal nævnes, at der følger enkelte fejlkilder med disse undersøgelser. De indsamlede hastigheder beror sig på trafikmålinger i få dage. Derudover kan hastighederne ikke undgå at være et produkt af omgivelserne, og de indsamlede fordelinger kan derfor ikke med garanti benyttes andre steder i landet.

Statistisk analyse på hastigheder

Den statistiske analyse for hastighedsfordelingerne har vist at der gennemgående er signifikant forskel på både middelværdierne og varianserne. Markfordelingerne har typisk lavere gennemsnitshastigheder end VISSIM-fordelingerne, men højere varians. Det ses ydermere, at for hastighedsfordelingerne ved 90 km/t er der en signifikant forskel på variansen, men ikke på middelværdien. Resultaterne fra de statistiske analyser viser kun, at der er forskel på fordelingerne, når de anvendes i VISSIM. Derudover kan resultaterne bruges til at skønne en given effekt eller konsekvens for trafikmodellen. Eksempelvis skønnes det, at signifikant forskel i varianserne medfører, at flowet gennem modellen bliver mindre, eftersom langsomme bilister påvirker hurtige bilister. Derudover bliver ankomstfordelingerne til holde-/bremsepunkter anderledes, hvilket ændrer trafikmønstret. Dette er i mit tilfælde ikke relevant, da der ikke er fuldt stop på motorvejen, men det bør alligevel nævnes.

Hvad der derimod kan konkluderes fra de statistiske tests er, at fordelingen for 110 km/t er markant forskellig. Konsekvensen af dette er, at:

- Flowet bliver anderledes, eftersom der ikke passerer samme antal biler over et givet punkt.
- At bilerne holder kortere sikkerhedsafstand, hvilket påvirker flowet.

- Den gennemsnitlige rejsehastighed bliver mindre, hvilket ændrer på trafikafviklingen.
- I de tilfælde, hvor en given simulering indeholder de samme elementer som teststrækningen, kan det konkluderes, at der er forskel på, hvorvidt der benyttes standardfordelinger eller markfordelinger. Det anbefales derfor i tilsvarende situationer, at brugeren benytter markfordelingerne.

Virkelig analyse

Ud fra tests på systemet med 90 km/t ses, at ændring i hastighedsfordelingerne ikke giver en væsentlig forskel i rejsetiden. For biler med markfordelingerne er rejsetiden øget med 13 sekunder og for lastbiler 14 sekunder over en strækning på 10 kilometer. For testen med 110 km/t var rejsetiden øget med 28 sekunder for biler og 5 sekunder for lastbiler. Denne forskel er ubetydelig og skyldes i høj grad, at det er en spidstime, som simuleres, og modellen indeholder dermed megen trafik på strækningen. Den intense trafik medfører påvirkninger af den ønskede hastighed, og bilernes rejsetid bliver derfor markant nedsat.

På baggrund af de virkelige tests kan det konkluderes, at simuleres perioder med høj trafikintensitet, at det er ligegyldigt, hvilke hastighedsfordelinger der vælges. Derudover kan det konkluderes, at i tilfælde, hvor bilerne har frit hastighedsvalg, bør der laves lokale undersøgelser af hastighedsfordelingerne, og disse bør indlægges i VISSIM.

Vægt og kraftfordelinger

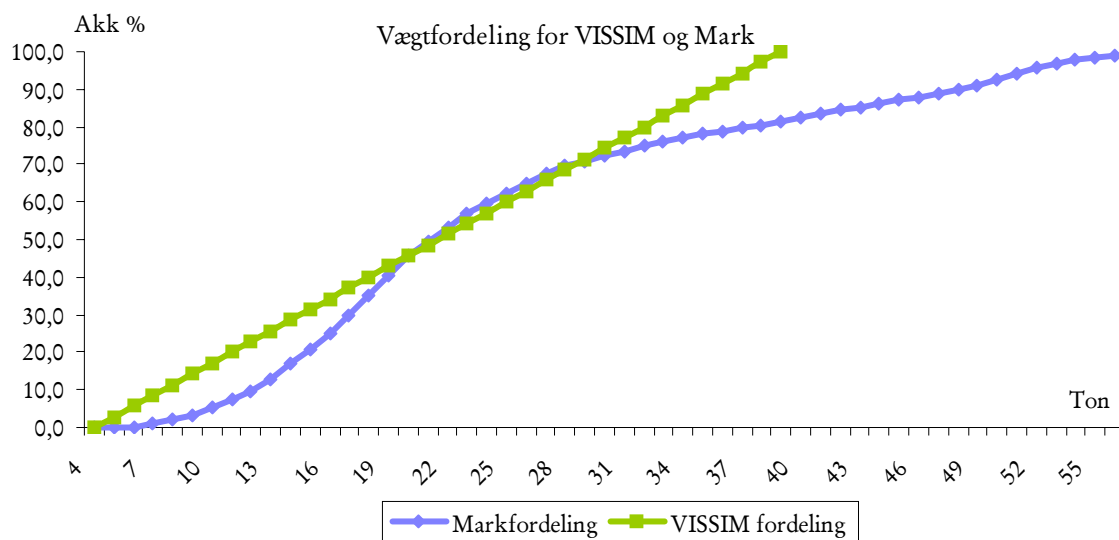
Vægt- og kraftfordelingerne er vigtige parametre til at kontrollere lastbiltrafikken i VISSIM. Fordelingerne er kun gældende for det, som i VISSIM kaldes HGV-køretøjer, altså lastbiler. Fordelingerne har en vigtig indflydelse på lastbilens adfærd på strækninger med længdehældninger i forhold til lastbilens acceleration og deceleration.

Da vægt- og kraftfordelingerne er lavet ud fra tyske undersøgelser, er der undersøgt, om fordelingerne i den danske lastbilpark er anderledes. Derudover er der undersøgt, hvilken indflydelse en ændring i disse fordelinger har på trafikafviklingen i VISSIM. Følgende problemstillinger vil derfor blive undersøgt:

- Den danske vægtfordeling for lastbiler.
- Den danske motorkraftfordeling for lastbiler.
- Indflydelsen på rejsetiden ved ændring fra VISSIM-fordelingerne til mark-fordelingerne.

Vægtsammenligning

På Figur 7.7 ses de danske lastbilers vægtfordeling sammenlignet med VISSIMs standardfordeling. I sammenligningen er der lavet følgende justeringer på datasættet.

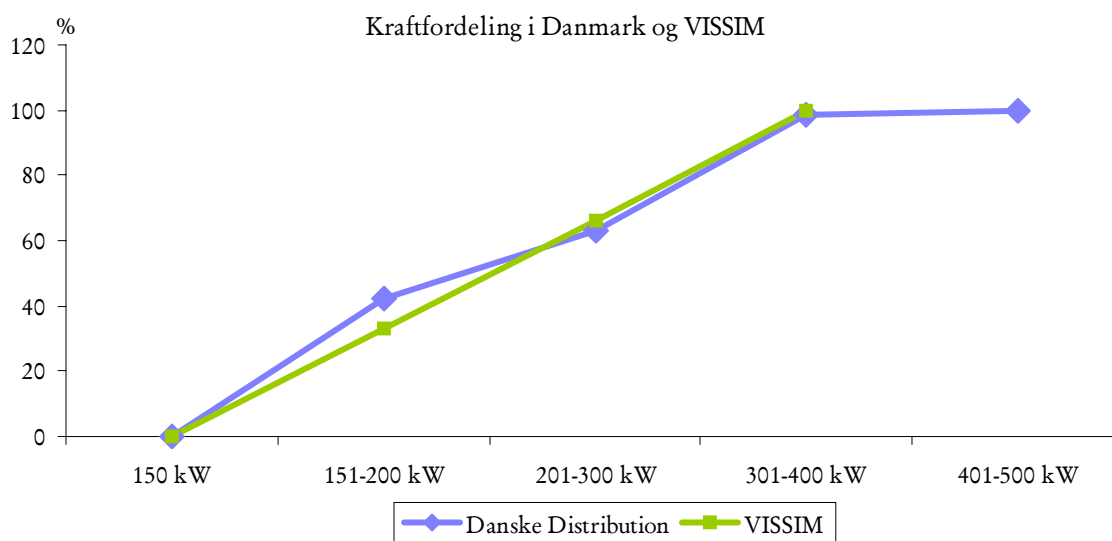


Figur 7.7: Vægtfordeling i VISSIM og Danmark [Danmarks Statistik 2008].

Lastbiler med totalvægt over 56 ton er ikke medtaget i den danske fordeling, da datasættet udgør mindre end 0,8 % af lastbilparken, og spiller derfor en ubetydelig rolle i denne sammenhæng. Det ses, at de to lineære vægtfordelinger specielt differentierer sig på de tunge områder, samt at den danske vægtfordeling ikke er lineær ligesom VISSIMs. Om denne ændring har en effekt, bliver testet i følgende afsnit.

Kraftsammenligning

På Figur 7.8 ses en sammenligning mellem kraftfordelingen i VISSIM og den danske fordeling. Fordelingerne er stort set ens dog med den lille forskel, at de danske lastbiler er repræsenteret i kategorien 401-500 kW.



Figur 7.8: Kraftfordeling fra VISSIM og fra danske lastbiler [Danmarks Statistik 2008]

Resultater

Dataindsamlingen vedrørende lastbilers vægtfordeling viser, at der er markant forskel på tyske og danske lastbiler. I VISSIM har lastbilerne en minimumsvægt på 2800 kg, hvor lastbiler i Danmark har en minimumsvægt på 3500 kg. Derudover har VISSIM-lastbilerne en maksimal vægt på 40 ton, hvilket er 33 ton mindre end den maksimale registrerede vægt for lastbiler i Danmark. Grafen viser endvidere, at ca. 20 % af de danske lastbiler kører med over 40 ton. En anden væsentlig forskel er, at VISSIMs fordeling er lineær, hvilket ikke viser sig at være korrekt i forhold til de danske fordelinger. På baggrund af dette kan det anbefales, at fremtidige brugere bør justere disse fordelinger til at passe, til dansk trafikadfærd.

Kraftfordelingen har vist sig at være tilsvarende den tyske. Dataindsamlingen har vist at VISSIM-lastbiler ikke er defineret med en højere motorkraft end 400, hvor den danske fordeling også er repræsenteret i 401-500 kW, dog med meget få lastbiler. Det vurderes på baggrund af dette, at VISSIM godt kan repræsentere den danske fordeling i fremtidige modeller.

Statistisk analyse på hastigheder

Den statistiske analyse har vist, at der for alle tilfælde er signifikant forskel i rejsetidens middelværdi. Det kan konkluderes, at gennemsnitsrejsetiden ved frit flow er langsommere med VISSIM-fordelinger i forhold til de danske fordelinger. Dog ses det, at forskellen er på ca. 1,5 %, hvorfor det må konkluderes, at en ændring i vægt- og kraftfordelingerne er ubetydelig.

Det ses også, at der ikke er signifikant forskel i varianserne, hvilket betyder, at fordelingen omkring middelværdien er ens. Dette skyldes i høj grad, at vægt-/kraftforholdet er begrænset af intervallet på 7-30 kW/ton. Ingen kan det konkluderes, at en ændring i vægt- og kraftfordelingerne er ubetydelig.

Resultaterne fra bakkeforsøget har tilmed vist, at rejsetiden ikke øges væsentligt. Den højeste forskel er ved 2000 meter og 5 % hældning, hvor rejsetiden forøges med 6,17 %. Tests med andre hældninger og vejlængder har vist en mindre forskel, hvorfor det kan konkluderes, at en ændring i vægt- og kraftfordelingerne er ubetydelig.

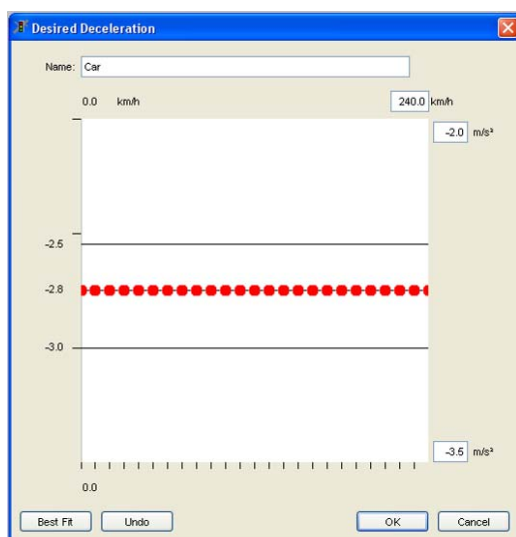
Virkelig analyse

Resultaterne fra de virkelige tests viser, at en ændring i vægt- og kraftfordelingerne ikke giver en væsentlig forskel i rejsetiden på motorvejsnetværket. I netværket på motorvejen var forskellen 1,0 % (5 sek), men for netværket i City Syd 9,7 % (20 sek). Denne lille forskel på motorvejen skyldes i høj grad, at der ikke er mange accelerationer og decelerationer, samt trafikken på strækningen er høj. Den høje grad af trafik medfører påvirkninger af den ønskede acceleration og deceleration, og lastbilernes rejsetid bliver derfor ikke markant nedsat. Derimod var der en større forskel på netværket i City Syd. Dette skyldes, at der er mange stop og start, samt lastbilerne kører flere steder i kø, hvor accelerationen har betydning for hvor hurtigt lastbilen kommer igennem netværket.

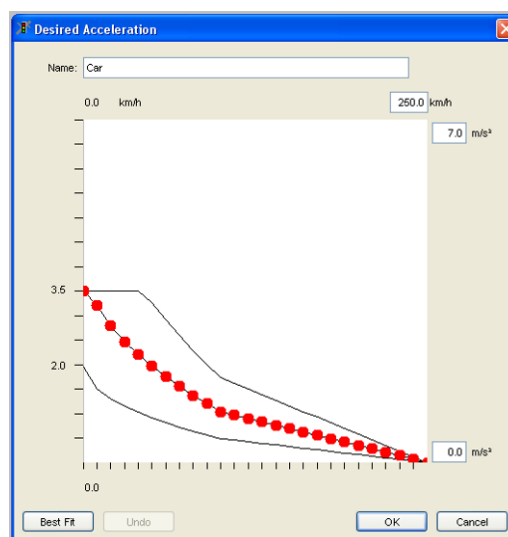
Det kan på baggrund af de virkelige test konkluderes, at det er ligegyldigt, hvilken hastighedsfordeling der vælges når der simuleres på motorvejsstrækninger med høj trafikintensitet. Derimod har fordelingerne betydning i mindre netværk med mange stop og start samt køkørsel. Der anbefales på baggrund af disse undersøgelser, at de i denne rapport vægt- og kraftfordelinger anvendes i fremtiden for netværk i byzoner.

Acceleration og Deceleration

Acceleration og deceleration er vigtige parametre i VISSIM og har indflydelse på kapaciteten, rejsehastigheden og rejsetiden. Alle køretøjstyper i VISSIM er tilknyttet en forskellig acceleration- og decelerationskurve. På nedenstående figurer ses eksempler på accelerations- og decelerationskurver for personbiler og lastbiler. Den røde linje på fordelingerne viser en middelværdi, og de sorte linjer repræsenterer grænseområdet for den maksimale og minimale de- og acceleration. Gennem modellen kan et køretøj antage forskellige de- og accelerationsværdier, som er et resultat af køretøjets aktuelle hastighed samt en tilfældig værdi inden for grænseområderne. Eksempelvis vil en bil med en hastighed på 130 km/t antage en gennemsnitlig acceleration på ca. 1 m/sek² jf. Figur 8.2 (aflæst på kurven).



Figur 8.1 Ønsket deceleration for biler
(x-aksen: km/t y-aksen: m/sek²)



Figur 8.2 Ønsket acceleration for biler
(x-aksen: km/t y-aksen: m/sek²)

Problemstilling

Tilsvarende tidligere undersøgelser er acceleration- og decelerationskurverne bygget på tyske værdier og dermed også tysk på trafikantadfærd. Det er i denne sammenhæng interessant at undersøge, om den danske adfærd er anderledes end den tyske, samt hvilken effekt en ændring af disse kurver har på trafikafviklingen i VISSIM. Eksempelvis ses det fra Figur 8.1, at den ønskede deceleration for både personbiler og lastbiler er konstant, hvilket fra personlige erfaringer ikke vurderes som værende korrekt. Derudover vurderes det, at tyske personbiler typisk har

kraftigere motorer i forhold til danske biler, og derfor har de en anderledes accelerationsadfærd. Der undersøges derfor følgende problemstillinger:

- Den 'ønskede accelerationskurve' for danske køretøjer.
- Den 'ønskede decelerationskurve' for danske køretøjer.
- Indflydelsen på trafikafviklingen i VISSIM ved ændring af accelerations- og decelerationskurverne fra de tyske kurver til danske kurver.

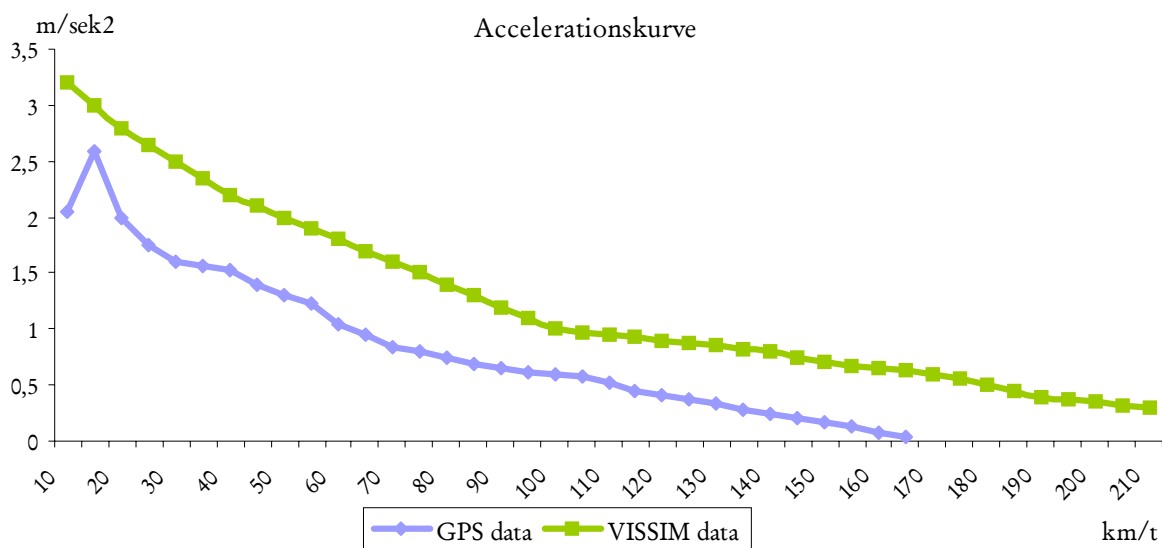
Dataindsamling

Aalborg Universitet har sammen med det tidligere Nordjyllands Amt og Topdanmark udviklet IT-udstyr til biler, som indgår i et projekt kaldet Spar på Farten. Her har en række forsøgspersoner fået installeret en GPS-modtager i bilen, som registrerer bilens position og hastighed hvert sekund. Formålet med forsøget har overordnet været at teste, om resultater fra et tidligere lignende projekt kunne overføres til en større gruppe bilister. Endvidere har man ønsket at undersøge, om udstyr til intelligent farttilpasning kombineret med bonus på forsikringspræmierne kan få bilisterne til at sænke farten og derved reducere ulykkesrisikoen [Lahrmann 2006, p.1].

Gennem projektet er forsøgspersonernes kørsel således blevet GPS-registreret i en årrække på vejnettet i Nordjylland. Bilerne i forsøget har hermed gennemgået mange de- og accelerationer, som efterfølgende er benyttet til at opstille de- og accelerationskurverne. Datasættet beror sig på GPS-logninger fra 166 personer over en periode på ca. tre år.

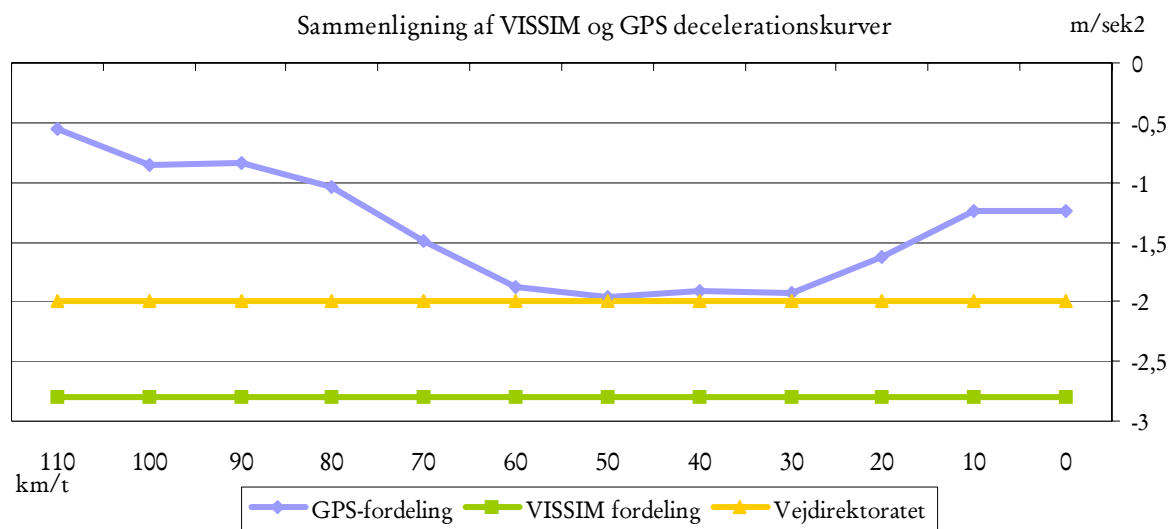
Da der ikke er fundet en standardmetode til at sortere og beregne de- og accelerationskurver fra GPS-data, er der selv opstillet en procedure til dette formål. Eftersom GPS-data indeholder megen "støj", er det nødvendigt at gennemgå flere sorteringsmekanismer for at frasortere denne.

Det endelige resultat ses på Figur 8.14. Her ses accelerationsfordelingerne fra GPS-dataen sammenlignet med VISSIM-fordelingerne.



Figur 8.14: Accelerationskurve fra GPS-data sammenlignet med VISSIM fordeling

Resultatet af decelerationen ses i Figur 8.15. Da der ikke forekommer kvalificerede GPS-logninger med en hastighed over 110 km/t, benyttes den sidst målte værdi til at definere hele hastighedsspektret over denne hastighed. Det ses, at decelerationskurven er betydeligt mindre end både VISSIMs og Vejdirektoratets kurve.



Figur 8.15: Decelerationsfordelingen efter område 2 fra GPS-data

Resultater

Accelerationskurven fra GPS-målingerne viste en markant lavere acceleration end kurven i VISSIM. Dette er ikke overraskende, da tyskerne typisk kører i større og kraftigere biler end danskerne. Decelerationskurvene viste ligeledes, at kurven ligger under fordelingen defineret i VISSIM. Desuden ses, at en deceleration ikke er lineær som antaget både i VISSIM og fra de danske vejregler. Decelerationen viser en stigende deceleration i starten, hvorefter denne falder igen. Det vurderes, at kurven ser således ud, da bilisten indledende vil sikre sig at kunne opnå fuldt stop i det rette punkt på strækningen. Derefter evaluerer bilisten situationen igen, hvor det typisk kræver mindre deceleration for at nå til fuldt stop. På baggrund af undersøgelserne vurderes det at den lineære fordeling ikke er korrekt, og yderligere undersøgelser bør foretages for et mere korrekt billede af den danske decelerationsadfærd.

Statistisk analyse

De statiske analyser viser, at der for et og to stop med 130 km/t forekommer signifikant forskel i rejsetidens middelværdi. Rejsetiden er forøget med 8 og 16 sekunder ved hhv. et og to stop. Dette er en forøgelse på ca. 10 %, hvilket ikke er uvæsentlig. Dette betyder, at accelerationen og decelerationen er langsommere for GPS-kurven, og kapaciteten ændres i netværket. Hermed kan følgende konkluderes på trafikafviklingen i VISSIM med frit flow:

- Flowet gennem netværket ændres og dermed også kapaciteten af vejen.
- Rejsetiden forøges gennem netværket og kapaciteten nedsættes.

De statistiske analyser viser, at der for et og to stop med 60 km/t også forekommer signifikant forskel i rejsetidens middelværdi med en forøgelse på ca. 2 % i rejsetiden. Denne ændring vurderes som ubetydelig, og på netværk med 60 km/t kan VISSIMs de- og accelerationskurver godt repræsentere den danske trafikadfærd. Det ses desuden, at der også er signifikant forskel i variansen for rejsetiden ved et og to stop med 130 km/t. Dette betyder, at fordelingen omkring middelværdien er forskellig, hvilket medfører en mere varieret kørsel. Ved kørsel med en hastighed på 60 km/t er der ikke forskel i varianterne, hvorfor det i denne sammenhæng er uvæsentligt, hvilken fordeling der benyttes.

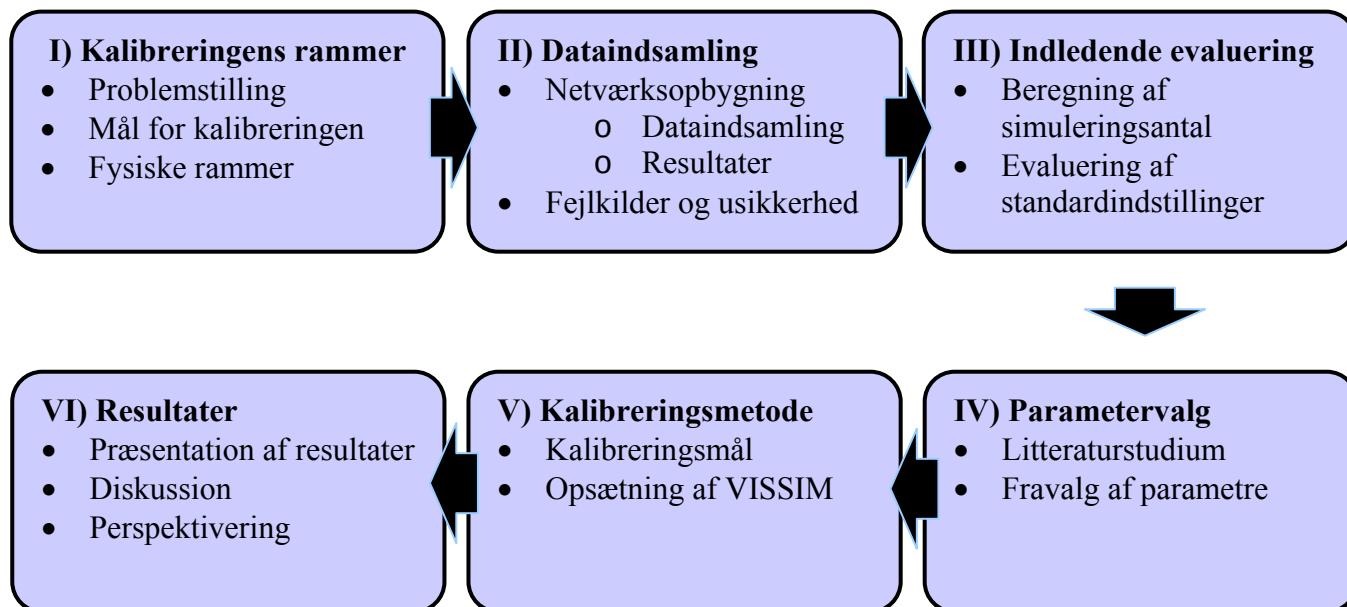
Virkelig analyse

Den virkelige analyse på strækningen omkring Aalborg har vist at der stort set ikke er forskel på, om der benyttes GPS-kurver eller kurverne fra VISSIM. Rejsetiden er forskellig med 4 sekunder, hvilket ikke er af betydning. Dette skydes i høj grad, at bilisterne ikke laver stopmanøvrer gennem netværket, og de decelerationer og accelerationer, der foretages, er ved høje hastigheder og derfor uden betydning.

Derimod har rejsetiden gennem netværket på Frederiksberg vist, at der forekommer en forøgelse af rejsetiden på 10 %, hvilket ikke er ubetydelig for fremkommeligheden og kapaciteten af netværket. Eftersom køretøjerne er længere om at komme igennem netværket, sker der en forøgelse af bilisterne på vejene, og kapaciteten nedsættes. Desuden bevirker en ændret acceleration og deceleration, at ankomstmønstret og startmønstret fra krydsene ændres. Dette påvirker kapaciteten af krydset, som igen påvirker kapaciteten af det samlede netværk. Det anbefales derfor, at der i fremtiden benyttes de korrekte accelerations- og decelerationskurver, så danske trafikforhold afspejles mere korrekt.

Kalibrering af flettestrækning

Det sidste område, som denne rapport behandler, er en kalibrering af flettestrækningen nord for Limfjordstunnellen. For at opnå overblik over kalibreringsprocessen opstilles et diagram, der illustrerer de trin, som efterfølgende behandles.



Problemstilling

Limfjordstunnelen åbnede i 1969 og har siden været et væsentligt element i byudviklingen i Aalborg. Siden åbningen er der sket en markant bolig- og erhvervsudvikling i den østlige del af kommunen, og det anslås i dag at, Limfjordstunnelen er den 14. mest befærdede motorvejsstrækning i Danmark. I 1999 nedsatte Aalborg Kommune, Nordjyllands Amt og Trafikministeriet et infrastrukturudvalg med det formål at undersøge fremtidige muligheder for infrastrukturudvidelser omkring Aalborg. Udvalget fastslog, at et af de centrale problemer omkring Aalborg er trafikafviklingen ved Limfjordstunnelen. I dag medfører uheld, reparationsarbejde eller andre hændelser, at trafikafviklingen over Limfjorden forsinkes markant til stor gene for specielt den regionale trafik. Med den forventede vækst i tunnelen vil denne problemstilling ikke blive mindre. Infrastrukturudvalget vurderede i år 2000, at den gennemsnitlige rejsehastighed i år 2015 ville nedsættes fra 55 km/t til 20 km/t i spidstimerne. [Aalborg Kommune 2000]

Situationen i dag

I dag er situationen den, at der i spidstimen mellem 15.00 og 17.00 sker kødannelse på netop denne strækning. I tunnelen er der tre spor, og lige efter Nørresundbygrenen kommer en flettestrækning, hvor der indsnævres til to spor. Denne sammenfletning er dagligt skyld i, at der sker en opstuvning gennem Limfjordstunnelen, og bilisterne oplever markante forsinkelser. Derfor er denne strækning valgt i dette projekt.

Overordnede mål for kalibreringen

De overordnede mål for denne kalibrering er således:

- At undersøge, om tyske standardindstillinger giver en tilfredsstillende afvikling af virkelighedens trafik.
- At kalibrere VISSIM til en flettestrækning fra tre til to spor, og dermed opnå danske parameterindstillinger.
- At illustrere en generel kalibreringsmetode, som kan benyttes til fremtidige kalibreringsprojekter.

Fysiske rammer

På Figur 9.1 ses kalibreringsområdet, som modellen bygges på. Modellens start finder sted lige før fletningen af Kridtsvinget og E45. Årsagen til den lange strækning før selve fletteområdet er skyldes følgende punktliste:

- Effekten af vejhældning i tunnelen har betydning for lastbilernes fart før fletteområdet.
- Bilerne i VISSIM indtager en mere naturlig kørsel, da de har en lang strækning til rådighed til at finde deres plads.
- Der er mulighed for at se kødannelserne gennem hele tunnelen.
- Det er muligt at tjekke, om der er fletteproblemer før tunnelen, som påvirker flowet i tunnelen.



Figur 9.1: Afgrænsning af kalibreringsområde

Bilerne kører således gennem flettestrækningen, og netværket stopper ca. 1 km nord for tunnelen. Det er ikke nødvendigt at simulere på en længere vejstrækning, da trafikken opnår et naturligt flow efter flettestrækningen.

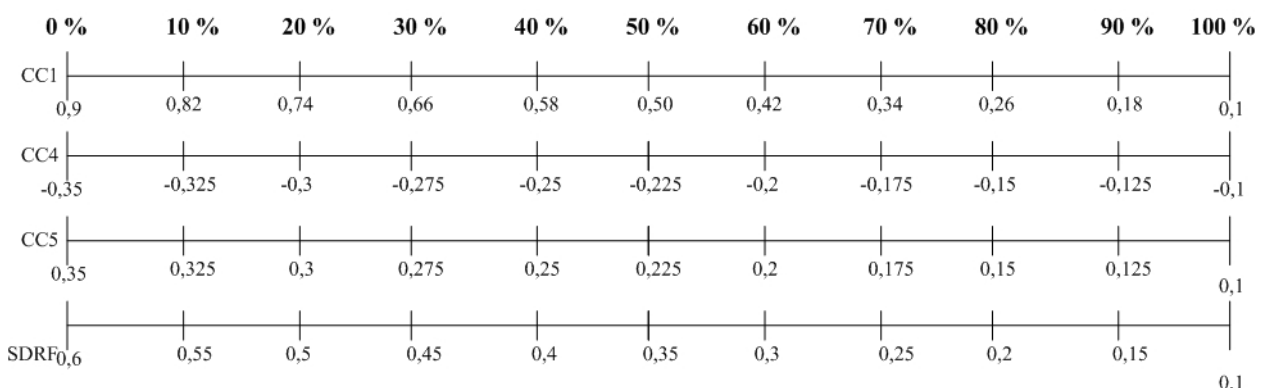
Dataindsamling

Kalibreringsmetoden i dette projekt er grundlæggende en sammenligning mellem det indsamlede data fra markobservationer og data fra VISSIM. Da der ikke kan ændres på typen af dataindsamling i VISSIM, dikterer VISSIM dataindsamlingen i marken. Det er derfor nødvendigt at have kendskab til dataindsamlingsværktøjerne, i VISSIM. Til kalibreringen af VISSIM er der valgt at tælle:

- Hastighed (km/t) pr. 5 min.
- Biler (Styk) pr. 5 min.

Kalibreringsmetode

Denne lineære løsningsmetode beror sig på, at man justerer alle parametrene samtidig i en aggressiv retning. Alle parametrene bliver således opstillet på en linje med et minimum og maksimum. Minimumværdierne repræsenterer defaultværdierne, og maksimum repræsenterer et vurderet ekstrema for aggressiviteten. Minimum vil i denne sammenhæng repræsentere 0 % aggressivitet og ekstrema 100 % aggressivitet. Ved at følge denne skala vil aggressiviteten for hver enkelt parameter vokse synkront. Parametrene bliver testet med skridt på 10 % for at se, hvornår aggressiviteten er tilstrækkelig til at afvikle trafikken. På Figur 9.7 ses den skala, som benyttes til kalibreringen.



Figur 9.7: Kalibreringsskema med procentvis aggression

Kalibreringsmål

Eftersom det er kompliceret at kalibrere en model til at ligne virkeligheden 100 %, er der opstillet en række succeskriterier baseret på statistiske trafikteorier samt visuelle inspektioner. En af de metoder, som benyttes, er en teori, som er udviklet af trafikplanlægger Geoffrey E. Havers i 70'erne til at sammenligne trafikintensiteter. Metoden er bygget på empiri og har vist sig at kunne anvendes til en række trafikale analyser. Da testen er selvskalerende, kan den benyttes på alle typer strækninger med alle intensiteter [Fellendorf 2004, p. 6] Formlen er således jf. (0.5):

$$GEH = \sqrt{\frac{2 \cdot (Sim_i - Obs_i)^2}{Sim_i + Obs_i}} \quad (0.1)$$

Hvor;

GEH	Sammenligningsværdi
Sim_i	Model intensitet (Biler/time) i tidsrummet i
Obs_i	Mark intensitet (Biler/time) i tidsrummet i

For anvendelse af GEH-metoden er gængse retningslinjer, at et GEH-tal på mindre end 5.0 betragtes som en god overensstemmelse mellem simulering og markobservationer. Ifølge det engelske Design Manual for Roads and Bridges (DMRB) bør mindst 85 % af trafikken i en model have et GEH-tal på under 5.

Da denne metode kun beskriver trafikmængder, er det også nødvendigt at stille et succes-kriterium for hastigheden i modellen. I denne sammenhæng beregnes der en korrelationskoefficient mellem marktællinger og VISSIM-tællinger. Det vurderes, at en korrelation på 90 % udgør et acceptabelt niveau. Der opstilles således følgende succeskriterier for kalibreringsprocessen, jf. Tabel 9.2.

Tabel 9.2. Kriterier for acceptabel kalibrering

Metode	Kriterium
GEH statistikker	85 % af $GEH < 5$
Total GEH statistikker	Sum $GEH < 4$
Korrelationen for hastighed	Minimum 90 %
Visuel inspektion	Den sammenlagte stilstand i sekunder for alle biler må ikke overstige 300 sekunder pr. simulering.
Visuel inspektion	Maks. 50 biler fjernet fra netværket. Bilerne fjernes fra netværket ved stilstand i mere end 10 sekunder

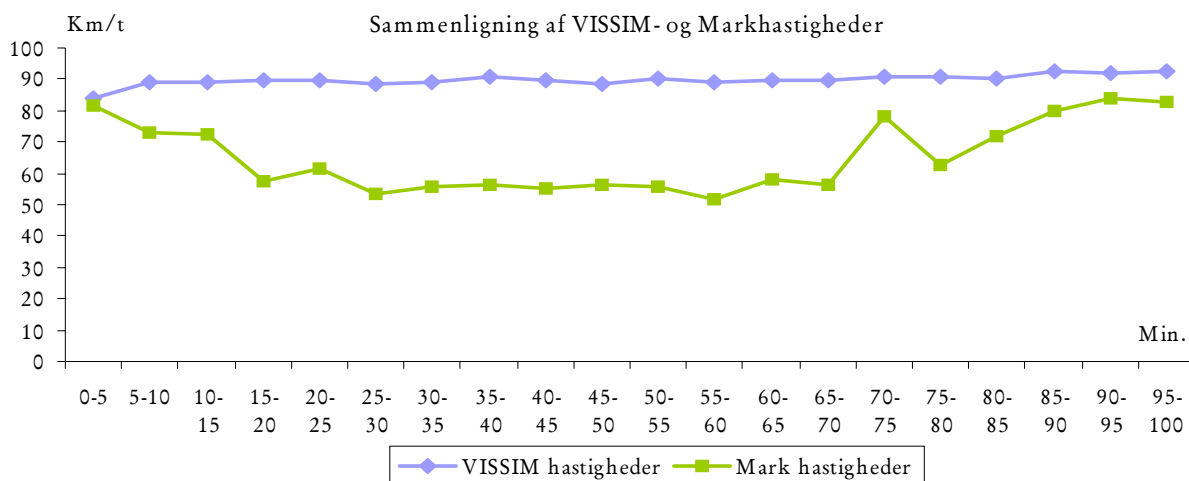
Resultaterne fra kørsler viser, at ingen af parametersættene kan løse opgaven på en måde, så alle kriterier er opfyldt. Flere af parametersættene løser de fleste krav undtagen kravet om

Tabel 9.3. Trafikafvikling med 20 % og 70 % aggressivitetsniveau

70%		
GEH Middel < 4	1,2	OK
85 % GEH < 5	100	OK
Korrelation R^2	70,8	Ikke OK
Kø i flettesporet	47	OK
Kø i modellen	0	OK

hastighedskorrelation på 90 %. I Tabel 9.3 ses resultater fra det aggressivitetsniveau, som løser opgaven bedst. Med en 70 % aggressivitet løses alle krav undtagen hastighedskorrelation.

Ved en aggressivitet på 70 % afspejler hastigheden gennem simuleringen ikke virkeligheden, jf. Figur 9.8. Figur 9.8 viser, at når aggressiviteten øges, kører bilerne tæt gennem hele modellen uden at tage hensyn til den forankørende bilist. Da den ønskede hastighed er sat til 90 km/t, kører bilerne med en gennemsnitshastighed på 90 km/t gennem hele modellen.



Figur 9.8 Korrelationen mellem gennemsnitshastigheden fra markobservationer og VISSIM-kørsler

Et eksempel på den upåvirkede kørsel er i intervallet 70-75 km/t, hvor der i markkurven sker en stigning i hastigheden, men ingen påvirkning ses i VISSIM-kurven. Hvis aggressiviteten sættes ned, holder bilerne større sikkerhedsafstand, og der sker kødannelse i flettesporet. Endvidere forplantes en tydelig chokeffekt fra indsnævringen gennem hele tunnelen. Denne chokeffekt er et resultat af, at VISSIM-bilerne ikke følger et normal køkørselsmønster. I VISSIM accelererer bilerne kraftigt mod de ønskede 90 km/t og stopper kraftigt, hvilket medfører en chokeffekt og dermed kødannelse. I virkeligheden er adfærden i køkørsel meget anderledes. Ved tæt trafik kører bilerne langsommere og mere flydende. Skulle der ske en åbning, accelererer bilen stille og roligt til et passende niveau, der svarer til omgivelserne.

Resultaterne viser, at trafikken afvikles tilsvarende virkeligheden, når modellen antager følgende:

Parameterindstillingerne antager værdierne jf. Tabel 9.4. Med disse indstillinger fletter trafikken hensigtsmæssigt, og der opstår ikke kø i flettesporet. Desuden medfører disse indstillinger, at W99 kan benyttes gennem hele modellen, samt at kødannelser og chokeffekt i tunnelen undgås.

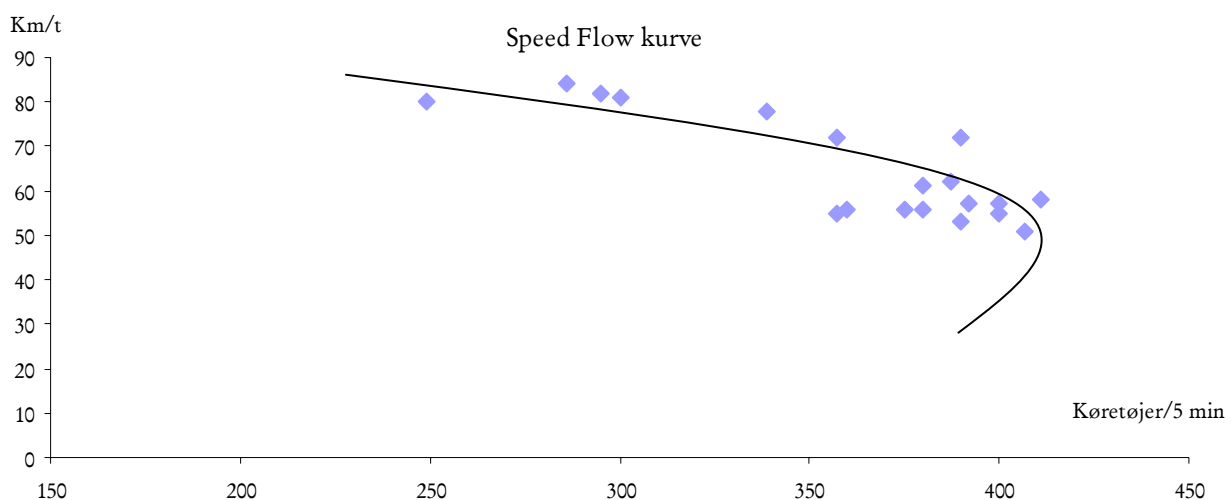
Tabel 9.4. Endelige kalibreringsparametre for flettestrækningen med 70 %.

Parameter	70 %
CC0	1,54
CC1	0,3
CC4	-0,163
CC5	0,163

Hastighedsprofilen i modellen skal topstyres, for at bilisterne får den korrekte hastighedsfordeling. Det vil sige, at der skal indlægges intelligent hastighedskontrol i hele simuleringsperioden.

Diskussion

Den trafikale situation omkring flettesporet i spidstimen er mere kompliceret end først antaget. Bilerne holder ikke i kø, men befinder sig nærmere i en præ-kø tilstand. Trafikken er således på grænsen til reel køkørsel, hvilket gør denne type trafik meget dynamisk og dermed svær at simulere korrekt. På Figur 9.11 ses speed/flowkurven for denne spidstime. Den indtegnede



Figur 9.11: Speed/Flowkurve for spidstimen illustreret med markobservationerne. Kurven er indlagt med fri hånd kurve kan forekomme en smule ”søgt” for at ligne den teoretiske kurve, men koncentrationen omkring kurvespidsen er en indikation på, at kapacitetsgrænsen er nået.

På netop kapacitetsgrænsen er der større tendens til, at bilerne hellere holder en lav fart og kører langsommere, end at de kører hurtigt og bremser hårdt. Det er her, VISSIM viser sin svaghed, og

resultaterne viser, at VISSIM ikke kan afbilde en trafikalsituation på grænsen til kødannelser. VISSIMs forfølgelsesmodel er simpelthen ikke god nok til selv at simulere denne type trafikafvikling. Dog kan der gennem grundige justeringer komme meget tæt på nutidens trafikafvikling. Der kan derfor på baggrund af disse undersøgelser sættes stort spørgsmålstejn ved brugen af VISSIM som argument for kapacitetsberegninger. Ofte bruges VISSIM til at illustrere fremtidige flaskehalse og kapacitetsproblemer ved at fremskrive trafikken på vejene. Da mine undersøgelser viser, at VISSIM ikke selv kan styre en forøgelse af trafikken og den naturlige hastighedsnedsættelse, er det nødvendigt at se kritisk på disse trafikmodeller. Problemet er derfor i bund og grund, at hvis VISSIM ikke kan kalibreres, så den overbevisende illustrerer nutidens trafikafvikling, er der ingen grund til at tro, at den kan illustrere fremtidens trafikafvikling.

Kalibreringen viser desuden, at VISSIMs standardindstillinger ikke kan afvikle trafikken fra flettesporet korrekt. De hårde "stop-kør"-opbremsninger i modellen medfører kødannelser og hermed en chokeffekt gennem tunnelen. Endvidere har det ved forøgelse af aggressionen vist sig, at bilisterne opnår en flettekapacitet, som kan afvikle trafikken. Det anbefales fremover, at der i denne lokale trafikalsituation benyttes de kalibrerede W99-værdier for korrekt trafikafvikling.

Kalibreringen viser også, at der stadig er problemer med hastigheden, som ligger konstant gennem hele simuleringsperioden, selvom flettemanøvren simuleres korrekt. Dog er det muligt ved topstyring og indlægning af intelligent fartkontrol at justere dette, så det stemmer overens med virkeligheden. Denne justering kræver indgående kendskab til det trafikale mønster, hvilket ikke altid er tilgængeligt i alle modelleringstilfælde. Da VISSIM ofte benyttes til at illustrere kapacitetsproblemer og trafikalsituationer tæt på kapacitetsgrænsen, er det vigtigt, at der sættes spørgsmål ved modellens opbygning i fremtiden. Rejsetiden gennem et netværk er ofte en parameter, som bliver brugt som argument til kapacitetsmangel i netværket. Men uden indstilling af de korrekte hastigheder, bil-indput og flettemanøvrer vakler argumenterne. Der anbefales derfor, at der som minimum indsamles hastighedsprofiler per kvarter for at simulere spidstimerne korrekt.

Til sidst skal der knyttes en kommentar til denne rapports kalibreringsmetode. Der er store usikkerheder forbundet med selve dataindsamlingen. Dataene er hentet fra én spidstime og kan ikke repræsentere det generelle billede af trafikken omkring Limfjordstunnellen. Derudover beror kalibreringen på to typer datasæt, hvilket ikke er tilstrækkeligt til at beskrive hele situationen omkring flettestrækningen. Det anbefales, at fremtidige kalibreringer indsamler data såsom kølængder, rejsetider, flow per 15 minutter og hastighed per 15 minutter, som kan indgå i kalibreringen. Derudover burde der indsamles yderligere data, som kan benyttes som valideringsdata efter kalibreringen. Disse data kunne være kølængder, hastighedsmålinger og rejsetider på andre steder i modellen eller fra andre dage. Derudover kunne en validering foregå på et tilsvarende system et andet sted i landet.

Den lineære kalibreringsmetode har vist sig at være anvendelig i situationen omkring flettestrækningen. Det skyldes primært, at det udelukkende drejer sig om flettemanøvrer og forfølgelsesmanøvrer, hvilket er mere afgrænsede situationer. Ved kalibrering af større netværk eller krydssystemer vurderes denne metode ikke som hensigtsmæssig, da den ikke medtager parametre uden for disse områder. I fremtidige kalibreringsprojekter anbefales det, at den trafikale situation skal ligne flettemanøvren ved Limfjordstunnelen, før den anvendes. Skulle brugere af VISSIM i fremtiden have lyst til at modellere strækningen omkring Limfjordstunnelen, kan mine resultater benyttes med stor succes. Parameterindstillingerne kan kun benyttes til at vise den nutidige situation, og der er ingen garanti for de virker i en fremskrivning af trafikken omkring Limfjordstunnelen.

Kilder til paper – For fuld kildeliste se afgangsprøve

- Aalborg Kommune 2000.** Aalborg Kommune, Nordjyllands Amt (2000). Udvikling af infrastrukturen i Aalborg-området. Aalborg: Aalborg Kommune.
- Dowling 2004.** Dowling, R. et. al. (2004). Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Software. USA: Federal Highway Administration.
- Fellendorf 2000.** Fellendorf, M. et. al. (2000). Validation of the Microscopic Traffic Flow Model VISSIM in Different Real-World Situations. Karlsruhe: PTV AG.
- Fellendorf 2004.** Fellendorf, M. (2004). Calibration of VISSIM - 14th ptv vision User Group Meeting. Karlsruhe: PTV-AG.
- Jeannotte 2008.** Jeannotte, K. et. al. (2004). Traffic Analysis Toolbox Volume II: Decision Support Methodology for Selecting Traffic Analysis Tools. Oakland: US Department of Transportation.
- Lahrmann 1994.** Lahrmann H. et. al. (1994). Vejtrafik. Danmark: Polytekniske forlag.
- Lahrmann 2006.** Lahrmann, H. (2006). Spar på Farten - Et forsøg med intelligent farttilpasning. Available: <http://www.sparpaafarten.dk/afrapportering/Folder-A3.pdf>. Last accessed 6. januar 2009.
- Lahrmann 2008.** Lahrmann, H, 2008. Vejledermøde med Harry Lahrmann
- Park 2008.** Park, B. et. al. (2006). Microscopic Simulation Model Calibration and Validation Handbook. Virginia: Virginia Transportation Research Council.
- PTV-AG 2008.** PTV-AG (2008). VISSIM overview. USA: PTVAmerica
- Rørbech 2008.** Jens Rørbech. (2006). Fremtidsscenarier vedr. transport i Danmark. Ugebladet Ingeniøren.
- Park 2006.** Park, B. et. al. (2006). Microscopic Simulation Model Calibration and Validation Handbook. Charlottesville, VA 22903: FHWA.
- Sode-Carlsen 2004.** Rolf Sode-Carlsen – Model fra afgangsprøve 2004.