

Denne artikel er publiceret i det elektroniske tidsskrift
Artikler fra Trafikdage på Aalborg Universitet
(Proceedings from the Annual Transport Conference
at Aalborg University)
ISSN 1603-9696
www.trafikdage.dk/artikelarkiv

Bedre modellering af trængsel i Landstrafikmodellen ved indarbejdelse af modul til beregning af krydsforsinkelser

Peter Ravn, petr@cowi.dk

COWI

Julie Storgaard Espensen, jues@cowi.dk

COWI

Rasmus Dyhr Frederiksen, rdf@rapidis.com

Rapidis

Abstrakt

Denne artikel beskriver arbejdet med at udvikle og indsamle data til at opbygge en krydsdatabase til Landstrafikmodellen. Vejdirektoratet igangsatte i 2012, et projekt med henblik på at udvide LTM med krydsmodellering. Med indførelse af krydsmodellering vil landstrafikmodellen opnå en klar forbedring, idet trængsels- og flaskehals effekter kan modelleres mere detaljeret.

Indarbejdelse af et krydsgenereringsmodul og indsamling af krydsdata til en krydsdatabase resulterer til gengæld et markant større datagrundlag og dermed større vedligeholdelsesomfang for modellen.

I artiklen beskrives den teoretiske, tekniske og praktiske fremgangsmåde for indførelsen af krydsmodellering i Landstrafikmodellen. Som forventet påvirker beregninger med krydsforsinkelser i Landstrafikmodellen rutevalget og den samlede rejsetid samt lokale ændringer i rutevalget.

Det videre arbejde består nu i at indarbejde krydsdata i Landstrafikmodellen, samt udvide den til at regner med 10 tidsperioder for bedre at kunne modellere trængslen.

Arbejdet med krydsdatabasen har også givet ideer til at forbedre modelleringen af trængsel i krydsyderligere, ved bl.a. at indarbejde muligheden for delte spor og trafikstyrede kryds i modellen.

Baggrund for inddragelse af krydsforsinkelser i Landstrafikmodellen

I den nuværende version af Landstrafikmodellen modelleres bilisters rutevalg ved hjælp af en statisk rutevalgsmode, som modellerer biltrafik som gennemsnitstilstande i en række tidsperioder henover døgnet. Effekten af trængsel beskrives ved at den modellerede rejsehastighed på hver vejkant sænkes i takt med at trafikken stiger.

Denne tilgang gør den grundlæggende dataopstilling relativ simpel, men modelmæssigt giver det nogen svagheder. Trængselseffekterne fra kryds kan ikke modelleres og det er derfor nødvendigt at lægge en ekstra forsinkelse ind på kanterne ved at justere kanthastighederne i modeldata. Denne løsning er dog langt fra optimal, det betyder at trafikanter får den samme forsinkelse uanset hvilken svingbevægelse de foretager i det efterfølgende kryds.

Indførelsen af krydsmodellering i Landstrafikmodellen har både fordele og ulemper. Modelmæssigt er det en meget klar forbedring, idet trængsels- og flaskehals effekter modelleres markant bedre og mere detaljeret. Til gengæld er der et markant større dataarbejde der er involveret, når ikke blot ca. 30.000 vejkanter skal beskrives i modeldata, men også ca. 4350 kryds og rundkørsler (hver typisk med 12 svingbevægelser).

Efter drøftelse mellem Vejdirektoratet og DTU Transport, besluttede Vejdirektoratet i 2012, at igangsætte et projekt med henblik på at udvide LTM med krydsmodellering. DTU Transport har i samarbejde med Rapidis ApS udviklet metoden til beregning af krydsforsinkelse og opstillet en model med 10 tidsperioder, så trængsel ligeledes kan vurderes for myldertidsperioderne. COWI har som konsulenter stået for dataindsamling og kvalitetssikring af informationer om krydsene og de enkelte sving, til beregning af krydsforsinkelser.

Modellering af trængselseffekter på strækninger

I Landstrafikmodellen, uden krydsmodellering, modelleres trængselseffekter ud fra kapaciteten på en vejkant, den skilte hastighed og mængden af trafik på kanten. Dette gøres vha. den såkaldte BPR-formel, som stammer fra den amerikanske Highway Capacity Manual. Formlen ser således ud til beregning af rejsetid:

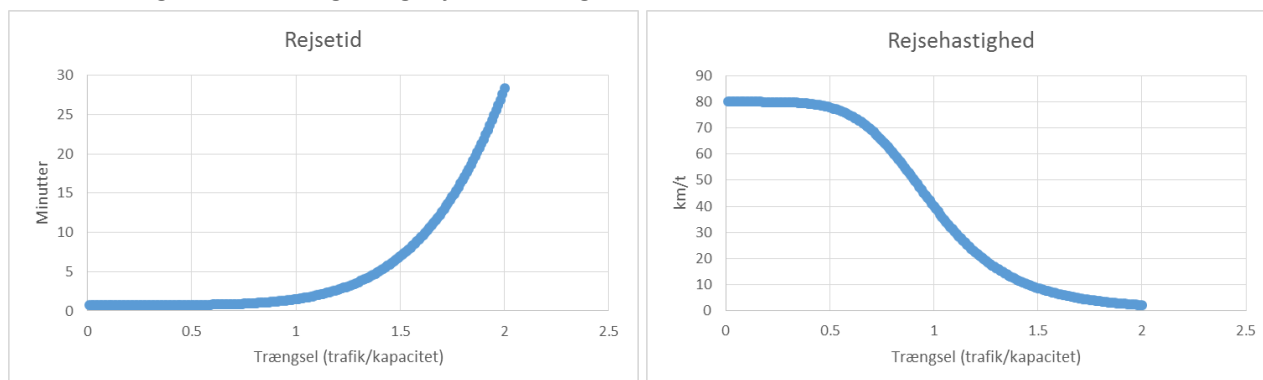
$$t = t_{skiltet} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{T}{T_{Kapacitet}} \right)^\beta \right)$$

Hvor α og β er model parametre som styrer forløbet af rejsetidskurven som funktion af kapacitetsudnyttelsen. Der vil typisk være opstillet forskellige sæt parametre, som styrer hvilken vejklasse der benyttes. Kapaciteten bestemmes i grove træk af antallet af kørespor, samt hvor brede de er.

Den tilsvarende formel for justeret rejsehastighed er:

$$V = \frac{V_0}{1 + \alpha \cdot \left(\frac{T}{T_{Kapacitet}} \right)^\beta}$$

Som formelen viser, vil rejsetiden på en kant stige og hastigheden falde i takt med at trafikken og dermed kapacitetsudnyttelsen stiger. Parametrene styrer præcist hvordan denne sammenhæng forløber. I Landstrafikmodellen er parametrene $\alpha = 1.0$ og $\beta = 5.2$ for en motortrafikvej. Dette giver følgende sammenhæng mellem trængsel og rejsetid/hastighed:



Figur 1 Eksempel på BPR-justering af rejsetid (1 km landevej med 80 km/t)

Hver vejstrækning har en rejsetid, der stiger i takt med stigende trafik. Men også at overbelastningen for en strækning skal være ret voldsom før rejsetiden stiger markant.

Ved at indføre krydsmodellering, bringes nye trængselseffekter ind i billedet. I forbindelse med gennemkørsel af et kryds, afhænger rejsetiden ikke længere blot af trafikmængden i en svingbevægelse, men også af:

- Mængden af trafik i evt. svingbevægelser der er vigepligt for.
- Svingets forløb f.eks. nedbremsning ved skarpt højresving.
- Antal kørespor i svingbevægelser
- Delte spor.
- Og for lysregulerede kryds, sandsynligheden for ankomst ved grønt.

Modellering af rejsetiden i kryds er grundlæggende mere detaljeret og kompleks end for strækninger, men afspejler også sammenhænge i trafikken, som ikke kan fanges med den rent strækningsbaserede tilgang. Specielt effekten af vigepligter gør, at en stor trafikstrøm ikke længere kun påvirker de biler der kører i selve strømmen, men også f.eks. alle underordnede svingbevægelser som prøver at krydse denne trafikstrøm.

De vigtigste ting, der opnås ved indførelse af krydsmodellering er:

- Den ekstra rejsetid pga. trængsel stiger og bliver mere realistisk.
- Der introduceres flaskehalse i kryds, hvilket der også er i virkeligheden.
- Krydsende trafikstrømme påvirker hinanden på grund af vigepligter i kryds og rundkørsler.

Modellering af forsinkelse i kryds

Forsinkelsesmodellerne for kryds og rundkørsler bygger på betragtninger omkring sandsynligheden for tilstrækkeligt store tidsgab i den trafik, der er vigepligt for således at der kan køres frem, kombineret med køteoretiske modeller for den tid, det tager at afvikle indkommende trafik. For de lysregulerede kryds medtages et ekstra led, som afspejler sandsynligheden for at ankomme mens der er rødt hhv. grønt lys.

Dette er bl.a. beskrevet i Vejdirektoratets *Trafikteknik – Kapacitet og Serviceniveau* (September 2010) og Highway Capacity Manual (2000 – Bureau of Public Roads).

De værdier for passagetider og størrelsen af tidsgab som anvendes i Landstrafikmodellen stammer fra Vejdirektoratet, og er baseret på danske observationer, som er forskellige fra data fra f.eks. USA.

Operationalisering af krydsmodellerne

For at kunne regne på krydsrelateret rejsetid i en statisk rutevalgsmode, er det nødvendigt at lave nogen forsimplinger. De væsentligste er:

- At der regnes krydsforsinkelser for et gennemsnit over en modelperiode på 1 time.
- At al krydsrejsetid tilbringes på selve svingbevægelsen. Det vil sige, at der ses bort fra effekter af tilbagestuvning ved en evt. køopbygning, og at noget af den tid en bil reelt vil bruge på vejkanten op til krydset i stedet tilskrives selve bevægelsen gennem krydset.
- Endelig tages der kun hensyn til cykel- og gang-trafik vha. en overordnede justeringer pr. svingbevægelse. Dette er valgt fordi cykel- og gang-trafik ikke modelleres detaljeret i Landstrafikmodellen og for at forsimple beregningerne.

Effekten af tilbagestuvning ignoreres, fordi det ikke håndteres godt i en statisk model. De andre antagelser er taget for at gøre operationaliseringen af krydsmodellerne overkommelig.

I det nedenstående opridses modellerne relativt kort.

Rundkørsler og prioriterede kryds

For rundkørsler og prioriterede kryds er beregningen grundlæggende ens.

Hvis en svingbevægelse ikke har nogen vigepligter, er der ikke nogen forsinkelse ud over den geometriske forsinkelse.

Grundlaget for modellering af krydsforsinkelserne er følgende:

- Kapacitet og trafik opgøres i personbilkvivalenter (pe). Dvs. en lastbil omregnes til f.eks. 1.5 eller 2.0 pe.
- Der beregnes en grundlæggende kapacitet for hvert spor i svingbevægelsen, styret af mængden af overordnet trafik og evt. sandsynligheden for kø i denne.
- Ud fra den beregnede kapacitet kan der, sammenholdt med mængden af trafik, beregnes en gennemsnitlig forsinkelse.

Sporets kapacitet

Først beregnes:

$$G = \frac{H \cdot e^{-H\tau/T}}{1 - e^{-H\delta/T}}$$

Hvor:

T er modelperioden i sekunder (som udgangspunkt en time = 3600 sekunder)

G er tilfartssporets grundlæggende kapacitet, pe/T (personbil-ækvivalenter i modelperioden).

H er summen af den overordnede trafik der er vigepligt for, i pe/T , dvs. summen af trafikken i alle overordnede svingbevægelser.

τ er det kritiske interval i enheden sekunder overfor motorkøretøjer i den overordnede trafikstrøm.

Værdien er typisk i intervallet 5.5 sekunder til 8 sekunder, og afhænger af svingbevægelsens forløb og antal spor der skal krydses.

δ er passagetiden i sekunder i tilfartssporet, typisk anvendes 3 sekunder.

De værdier der anvendes for τ og δ er afhængige af om der er tale om et prioriteret kryds eller en rundkørsel.

Ud fra den grundlæggende kapacitet G beregnes svingbevægelsens kapacitet, N_{max} (pe/T), ved at justere for sandsynligheden for kø-fri tilstand i evt. overordnede svingbevægelser:

$$N_{Max} = s_{køfri\ tilstand} \cdot G$$

Det er specielt for prioriterede kryds, at der skal tages hensyn til sandsynligheden for kø fri tilstand i de overordnede trafikstrømme. Dette skyldes, at en overordnet trafikstrøm selv kan have vigepligt overfor en anden trafikstrøm og der kan derfor være en risiko for kødannelse. I rundkørsler udelades denne justering og $N_{Max} = G$.

Beregning af belastning

For at beregne forsinkelsen pr. køretøj for en svingbevægelse anvendes følgende formel:

$$t_m = t_1 + t_2$$

Hvor

t_m = er middelforsinkelse, sekunder/køretøj

t_1 = middelopholdstid forrest i køen (før gennemkørsel af krydset)

t_2 = middelopholdstid i køen (bag forreste position)

Detaljeret ser formlen således ud:

$$t_m = t_1 + t_2 = \frac{T}{N_{Max,Kt}} + \frac{T}{4} \cdot \left((B - 1) + \sqrt{(B - 1)^2 + \frac{8 \cdot B}{N_{Max,Kt}}} \right)$$

B er belastningsgraden og beregnes således:

$$B = \frac{N}{N_{Max}}$$

Hvor både N_M og N_{MAX} er i enheden pe/T

$N_{Max,Kt}$ er svingbevægelsens kapacitet i antal køretøjer/ T , **ikke** i pe/T . $N_{Max,Kt}$ beregnes således:

$$N_{Max,Kt} = of \cdot N_{Max}$$

of er en omregningsfaktor og beregnes således:

$$of = \frac{N_{Kt}}{N}$$

Hvor N_{Kt} er trafik i svingbevægelsen, antal køretøjer/ T

N er trafik i svingbevægelsen i pe/T

Lysregulerede kryds

Lysregulerede kryds bygger på samme overordnede modeltilgang, men inddrager et par ekstra faktorer. Foruden selve krydset opbygning, indgår også en beskrivelse af evt. grøn/rød-bølges effekter i krydsdata. Overordnet ligner forsinkelsesberegning meget den som anvendes for prioriterede kryds og rundkørsler (formel taget fra Vejdirektoratet *Kapacitet og Serviceniveau*):

$$t_m = kf_{AT} \cdot t_1 + t_2$$

t_1 er den middelforsinkelse som trafikanterne oplever på grund af ankomst til krydset uden nogen særlig kø. Denne justeres op eller ned afhængig af evt. grøn/bølge effekt

t_2 modellerer den tid der evt. skal holdes i kø før der kan køres frem i krydset.

Ved lave belastninger dominerer t_1 , og ved høje belastninger er det t_2 som er den største del af den samlede forsinkelse.

t_1 og t_2 beregnes således:

$$t_1 = \begin{cases} \frac{(O - Egr)^2}{2(O - B \cdot Egr)} & \text{for } B < 1,0 \\ 0,5 \cdot (O - Egr) & \text{for } B \geq 1,0 \end{cases}$$

og

$$t_2 = \frac{T}{4} \cdot \left((B - 1) + \sqrt{(B - 1)^2 + \frac{4 \cdot B}{N_{Max,Kt}}} \right)$$

Hvor

t_m er middelforsinkelsen i tilfartssporet i sekunder/køretøj

O er signalets omløbstid i sekunder

Egr er tilfartssporets effektive grøntid

T er beregningsperiodens længde i sekunder

B er køresporets belastningsgrad

$N_{Max,Kt}$ er tilfartssporets kapacitet i enheden køretøjer/ T

kf_{AT} er en korrektionsfaktor for ankomsttyper (grøn/rød-”bølge” justering)

Dette ser umiddelbart relativt simpelt ud. Men kompleksiteten ligger her i detaljen.

For spor uden vigepligter er det relativt simpelt at beregne en sporkapacitet ud fra passagetid og grøntidsfordeling.

For spor som har vigepligt overfor overordnet trafik i grøntiden, er sagen lidt mere kompleks:

- Det skal beregnes hvor meget grøntid, der er tilbage efter at en evt. kø i den overordnede trafik er blevet afviklet.

- Der skal beregnes en sporkapacitet under hensyntagen til at der skal afventes tidsgab i den overordnede trafik efter køen er afviklet.
- Evt. skal der tages hensyn til en evt. beskyttet grøntid ("grøn pil"), som er grøntid, hvor der ikke er vigepligt for overordnet trafik.

Der henvises til *Kapacitet og Serviceniveau*, samt *Highway Capacity Manual*, for en nærmere gennemgang af dette.

Geometrisk forsinkelse

Endelig tilføjes der til slut en geometrisk forsinkelse, som kommer oveni de beregnede middelforsinkelser. Den geometriske forsinkelse afspejler den ekstra tid som bruges på en evt. nedbremsning eller fuldt stop, før gennemkørsel, samt den ekstra accelerationstid ud af krydset. Forsinkelsen afspejler svingbevægelsens forløb, da der skal bremses hårdere ved højresving end ved ligeud kørsel, samt sandsynlighederne for delvis eller fuld stop, som beregnet i forsinkelsesmodellerne.

Den geometriske forsinkelse er relativ lille, men nyttig at inddrage idet lastbiler straffes hårdere end personbiler pga. dårligere deceleration og acceleration.

Data & Teknik

Landstrafikmodellen, teknisk baggrund

En stor og detaljeret trafikmodel som Landstrafikmodellen stiller store krav til håndtering af data. Både med hensyn til effektiv håndtering og behandling af store datamængder, samt til håndtering af detaljerede geografiske data.

Teknisk er Landstrafikmodellen opbygget ved hjælp af følgende elementer:

- ArcGIS
 - Håndtering og redigering af geografiske data
 - Visualisering af beregningsresultater
 - Opbygning og afvikling af beregningsprocesser
- SQL Server databasesystem til håndtering af (store mængder) relationelle data, samt afvikling af SQL forespørgsler
- Traffic Analyst, en trafikmodel udvidelse til ArcGIS, udviklet af Rapidis
 - Specialiserede datamodeller for trafikmodelldata
 - Redigeringsværktøjer til trafikmodelldata (kollektive linjer og køreplaner, vejkryds)
 - Analyse og visualiseringsværktøjer for trafikmodelldata
 - Beregningsmoduler, især rutevalgsmodeller for kollektive rejsende og vejtrafik.
- Specielle beregningsmoduler implementeret fra bunden af til Landstrafikmodellen, især efterspørgselsmodel samt gods/fragtmodel.

Endelig er der integreret en Logistikmodel fra det hollandske firma Significance.

Arbejdet med krydsmodellering har konkret involveret:

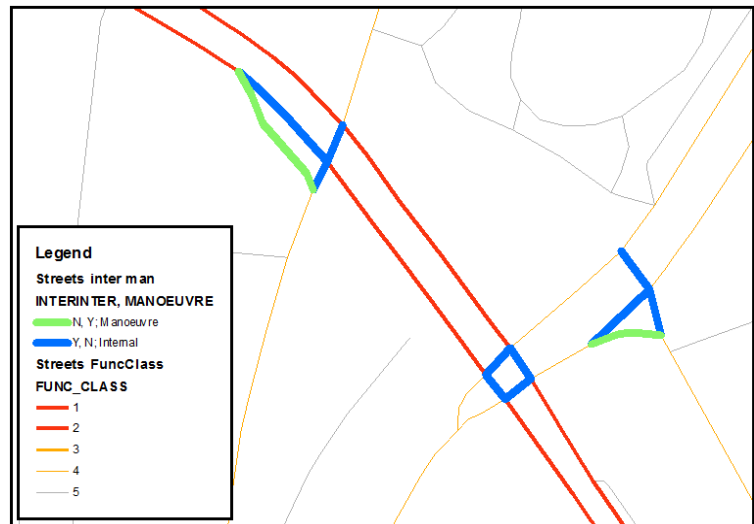
- Udvidelse af datamodellen for trafikmodelldata i Traffic Analyst
- Udvikling af redigeringsværktøjer til redigering af krydsdata
- Udvidelse af selve beregningsmodulet for bilrutevalgsmodellen

Håndtering af detaljerede geografisk data for kryds

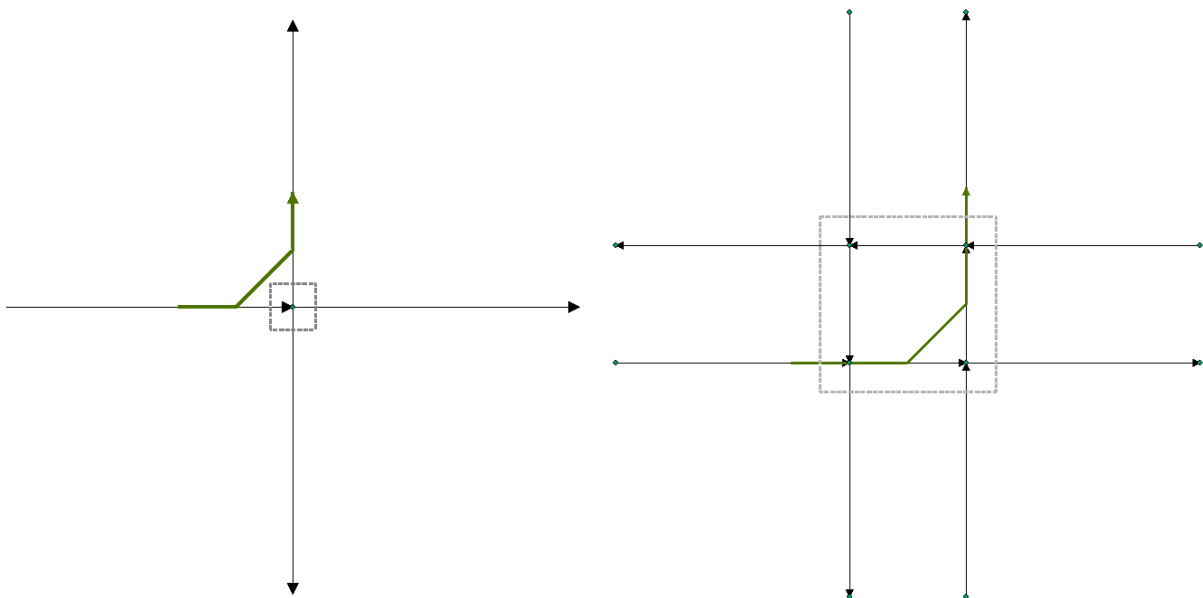
Landstrafikmodellen har fra starten været designet omkring brugen af GIS til at håndtere de geografisk relaterede data. Dette har gjort det muligt at tage udgangspunkt i et kommercielt vejnetværk fra Navteq, som udgangspunkt for modelvejnettet. Dette giver en høj detaljeringsgrad i modelnettet og mulighed for gode visualiseringer.

På den anden side betyder det at håndteringen af modeldata for kryds og rundkørsler skal være væsentligt mere fleksibel, idet kryds og veje kan være beskrevet særdeles detaljeret i de Navteq-data som der er taget udgangspunkt i.

For eksempel, så var det tidligere normalt at beskrive et helt kryds med en knude der repræsenterede hele krydset, samt de tilhørende vejmidter. Dette gjorde det relativt simpelt at beskrive svingbevægelser som hørende til en bestemt knude.



Figur 2 Eksempel på Navteq data



Figur 3 Svingbevægelse i et simpelt, hhv. mere detaljeret kryds

Her er det datamæssigt muligt entydigt og simpelt at beskrive en svingbevægelse ud fra:

- Frakant-Id
- Tilkant-Id
- Knude-Id

Men situationen er mere kompleks, når der anvendes et mere realistisk og detaljeret vejnet, som f.eks. indeholder dobbeltdigitaliserede kanter, hvor hver vejbane er digitaliseret for sig for nogle vejtyper, eller der er lavet en detaljeret modellering af vejkanterne i krydset.

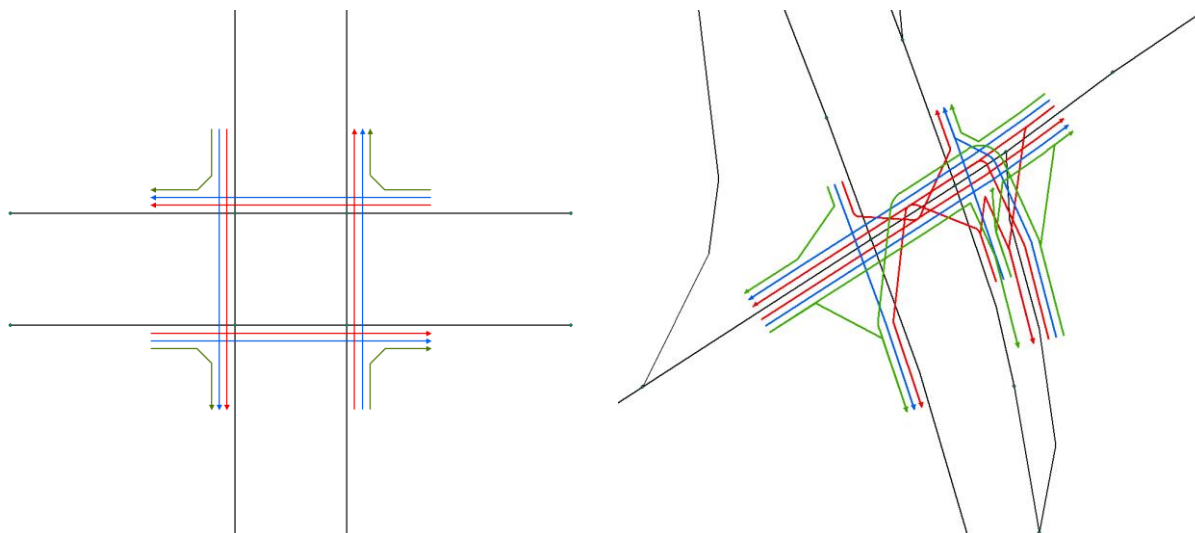
Her er en svingbevægelse ikke længere en bevægelse fra én kant til en anden, igennem en knude, men i stedet en bevægelse hen over en sekvens af kanter.

Da ArcGIS indeholder en meget stærk datamodel (samt tilhørende funktioner) til at håndtere detaljerede vejnetsdata inklusive svingbevægelser, blev det besluttet at bygge oven på denne.

ArcGIS – Håndtering af vejnetsdata med sving

For at kunne arbejde med kryds og detaljerede svingbevægelser i ArcGIS, kræves udvidelsen Network Analyst. Denne udvidelse føjer en detaljeret datamodel for vejnet og sving til ArcGIS, samt værktøjer som gør det lettere at vedligeholde og redigere detaljerede vejnet og den tilhørende netværkstopologi.

Sving beskrives i ArcGIS med en GIS-feature som starter på tilfartskanten og slutter på frafartskanten, samt løber hen over en række kanter i krydset. Dette element kaldes et *Turn* i ArcGIS. Et sving angiver dels en mulig bevægelse (eller et muligt forbud), men det kan også indeholde modelldata, såsom rejsetid eller længde.



Figur 4 Eksempler på alle svingbevægelser i mere komplekse kryds

Ved at anvende ArcGIS med Network Analyst som grundlag for datamodellen, er det muligt at håndtere komplekse modelvejnet i GIS, som er dannet på basis af kommercielle GIS-data.

Datamodel for kryds-data, baseret på ArcGIS' datamodel for vejnetværk

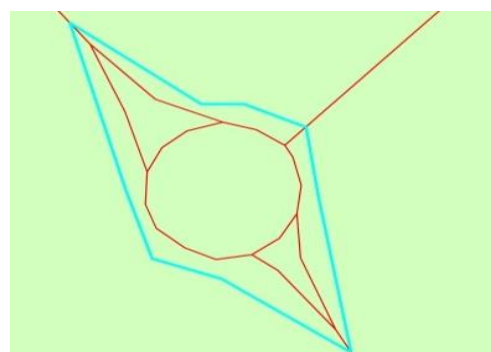
Datamodellen for kryds består af 2 overordnede elementer:

- Et geografisk element, en polygon, som afgrænser de kanter og svingbevægelser som indgår i krydset.
- En håndfuld tabeller som knytter sig til *Turns*, som er geografiske elementer i ArcGIS og som beskriver en svingbevægelse.

Omsluttende Polygon – Intersection

De omsluttende polygoner, der beskriver hvad der hører til hvert kryds, er dels input til dataetableringsværktøj, og dels output, som information til brugeren hvis de autogenereres af dataopstillingsværktøjet.

Hver polygon har en ID. Denne ID går igen på de svingbevægelser som hører til det kryds som polygonen omslutter. Svingbevægelser forbinder de kanter som skæres af polygonen. Disse er fra- og til-fartskanter i krydset.



Figur 5 Eksempel på polygonen om en rundkørsel

Datamodel for kryds/sving

Datamodellen for svingene i et kryds skal beskrive følgende elementer:

- Hvilke svingbevægelser er overhovedet tilladte?
- Hvilken type kryds/rundkørsel er der tale om?
 - Afhængigt af typen er det forskellige modelparametre som skal beskrives

- Evt. vigepligter mellem svingbevægelser skal beskrives
- Evt. variationer i model-parameter i løbet af modelperioden skal beskrives. Dette er mest relevant i forbindelse med lysregulerede kryds, hvor især omløbstider, grøntider og synkroniseringer kan variere en del.

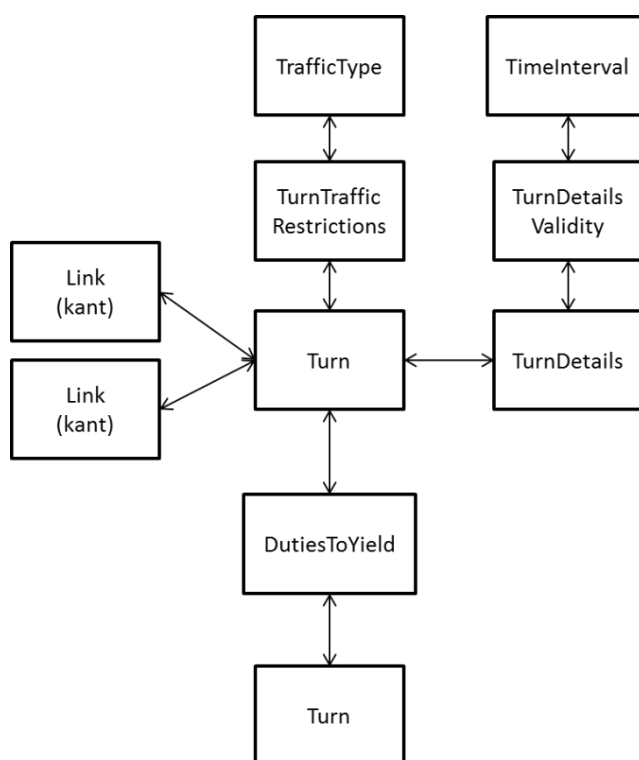
Traffic Analyst udnytter *turns* (svingbeskrivelsen) i ArcGIS, ved at tilføje en tabel med modelattributter, således at der er en record pr. turn. Tilsvarende føjes en ekstra tabel til, med output data fra beregninger.

Den basale *Turn* input tabel beskriver de grundlæggende data for en svingbevægelse i et kryds, hvis der anvendes faste forsinkelser. For at håndtere modeldata for krydsforsinkelsesmodellerne anvendes en række supplerende tabeller.

Disse tabeller er:

- *TurnDetails* – supplerende model oplysninger om de svingbevægelser for hvilke der skal beregnes trafikafhængige forsinkelser.
- *TurnTrafficRestrictions* – angiver evt. forbud for trafiktyper
- *DutiesToYield* – angiver om én svingbevægelse indenfor et kryds har vigepligt overfor en anden svingbevægelse.
- *TurnDetailsValidity* – angiver hvilke modeldata for en svingbevægelse som skal anvendes i hvilke modeltidsintervaller. Samme sæt data kan sagtens anvendes i flere eller alle tidsperioder.

Sammenhængen mellem disse tabeller kan beskrives vha. nedenstående figur:



Figur 6 Oversigt - de forskellige tabeller som tilsammen beskriver et kryds

En komplet gengivelse af det fulde indhold af disse tabeller kan ses i *Traffic Analyst Manual v. 3.9*.

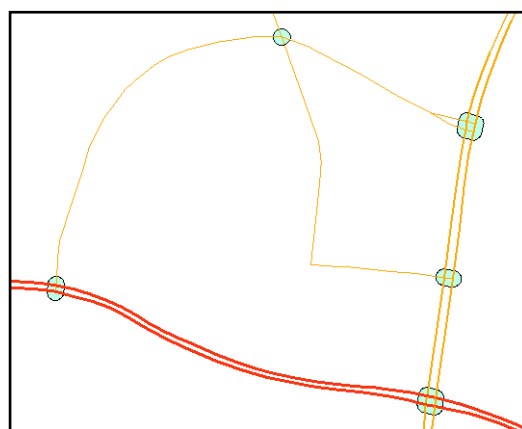
Værktøjer til dataopstilling, redigering og visualisering

Der er udviklet et værktøj som hjælp til at etablere de detaljerede model-data for kryds. Helt overordnet gør værktøjet følgende, med udgangspunkt i et GIS model-vejnet:

- Der etableres bud på hvor der er kryds, og hvad omfanget af disse kryds er (hvilke knuder og kanter der hører til hvert kryds). Kryds markeres ved hjælp af en polygon (brugeren kan også selv oprette disse).
- Dernæst gives et bud på hvilken type krydset er:
 - Rundkørsler identificeres på basis af kant-typer i modelnettet
 - Flettespor, der identificeret ud fra vinkler, modelleres ikke som kryds, ej heller pseudo-knuder med 2 kanter.
 - Ellers skydes på om der er tale om prioriteret eller et lysreguleret kryds på basis af trafikmængden i krydset.
- Til slut, på basis af kryds-polygonen samt den angivne kryds-type, etableres et bud på detaljerede kryds-model data. Der dannes:
 - Sving (hvor kanter som krydser kryds-polygonen anvendes som til- og frafarts-kanter), under hensyntagen til ensretninger i model-vejnettet. U-sving dannes som udgangspunkt ikke i simple kryds.
 - Bedste bud på hvilke til- og frafartskanter i krydset, der er hhv. primær og sekundær-veje.
 - Model-attributter for hvert sving
 - Angivelse af vigepligter

Dette værktøj er i den første version udviklet som et Geoprocessing modul til ArcGIS, og derfor lettest at anvende på en stor mængde data (hele vejnettet), i stedet for 1 kryds ad gangen.

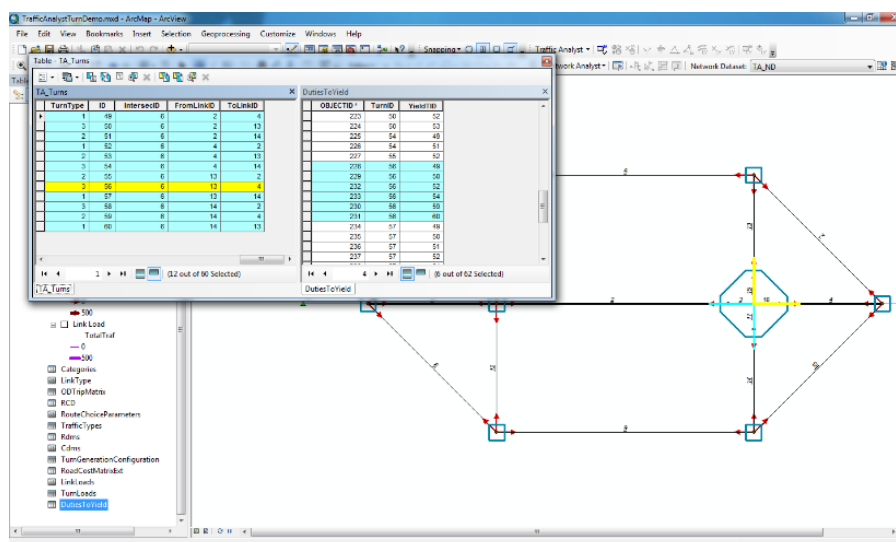
Funktionaliteten er sidenhen blev implementeret i redigeringsværktøjet, således at en bruger nu kan nedlægge og oprette enkelte kryds, med bud på grunddata for krydset. Især genereringen af vigepligter har vist sig at være en stor hjælp.



Figur 7 Kryds angives overordnet vha. omsluttende polygoner

Redigering og visualisering af kryds-data

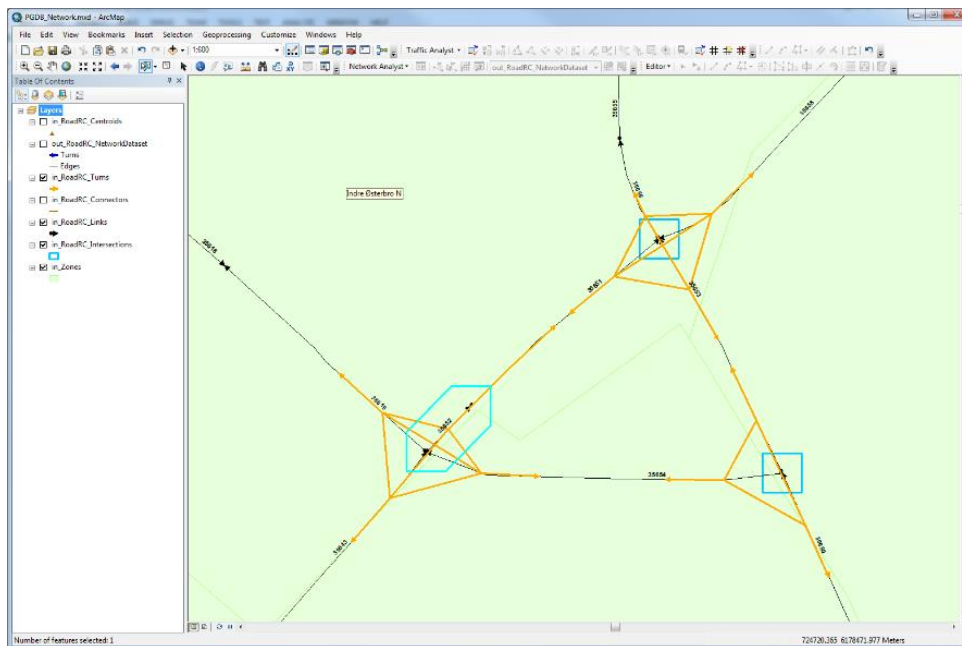
Det er i princippet muligt at redigere kryds-data direkte i ArcGIS, ved at åbne de relevante tabeller, og redigere værdierne direkte.



Figur 8 Eksempel på redigering af svingbevægelse og vigepligter direkte i ArcGIS

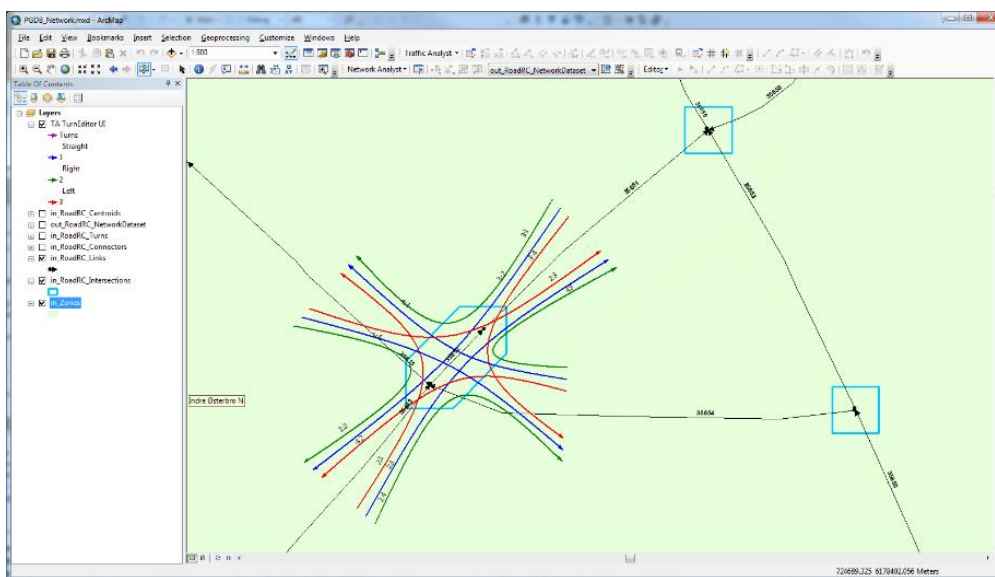
I praksis er det dog en ret uoverkommelig tilgang, og arbejdet kan udføres langt mere effektivt, med en vis assistance og automatisk i dataredigeringen. Der er derfor løbende blevet arbejdet med redigeringsværktøjer som kombinerer en kortvisning med en tabelbaseret redigering af krydsdata.

Udgangspunktet er de basale krydsdata, inklusive den indrammende polygon for hvert kryds:



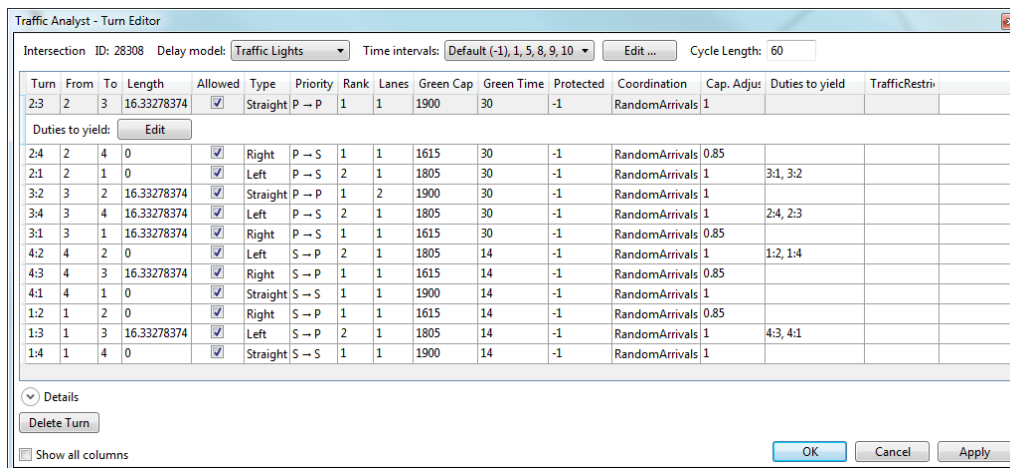
Figur 9 Kortvisning - vejnet og kryds-polygoner

Kryds udvælges ved at klikke i kortet, og en stiliseret visning dannes. Herefter kan svingbevægelser tilsvarende udvælges i kortet, og et redigeringsværktøj aktiveres.



Figur 10 Stiliseret visning af svingbevægelser

Når data redigeres vha. redigeringsværktøjet understøttes og automatiseres arbejdet så vidt muligt. F.eks. kan data ny genereres for et kryds med et par klik, der er kun gyldige vigepligter at vælge imellem og modelparametre vælges fra dropdown menuer.



Figur 11 Redigeringsværktøj for krydsdata

Dataindsamling af krydsdata

Ved autogenerering af krydspolygonerne blev der til at starte med genereret 4.967 kryds i hele modellen. Alle krydsene blev derefter gennemgået manuelt og fysiske data om krydsene indsamlet. Disse er efterfølgende brugt til at definere og kode krydsdata for alle rundkørsler, vigepligts- og signalregulerede kryds. Dataindsamlingen til krydsdatabasen er gennemført med følgende forudsætninger:

- År 2010 som basis i krydsdatabasen
- COWIs luftfoto for år 2010
- LTM_vejnet
- Standard signalplaner

Den manuelle gennemgang af de genererede kryds har medført større ændring af data forbundet med krydsene i forhold til den første generering. Blandt andet er mere komplicerede kryds typer introduceret, så som signalregulerede rampekryds. Samtidig er nye krydspolygoner tilføjet og 639 krydspolygoner slettet, så modellen efter gennemgangen indeholder 4.348 kryds, hvoraf de 20 manuelt er tilføjet til modellen.

Mange af de slettede krydspolygoner, skyldes at krydspolygonen var en del af et større kryds eller genereret på steder, hvor der ikke har været tale om kryds med forsinkelser, men f.eks. dobbeltdigitalisering af veje. Derudover er krydstypen ændret for en del kryds da mange prioriterede kryds viste sig at være signalreguleret og omvendt. Den manuelle gennemgang har haft stor værdi og været nødvendig for det har vist sig, så har det været svært at definere kriterierne for hvornår et kryds er signalreguleret eller vigepligtsreguleret.

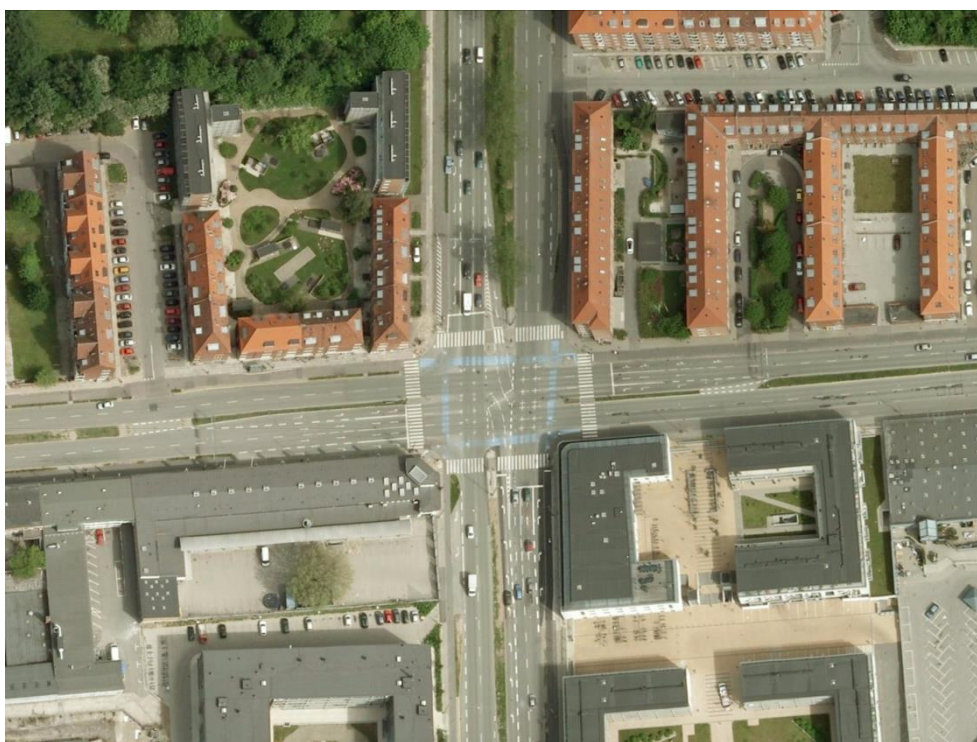
Krydstype ID	Krydstype	Oprindelig kryds generering	Behandlede krydsdatabase
-1	Ikke kryds (alle slettet)	54	0
0	Fixed delay	0	0
1	Prioriteret kryds	3.123	2.002
2	Rundkørsler	1.048	995
2.3	Signalreguleret rundkørsler	0	4
3	Signalreguleret kryds	742	1.263
4	Signalreguleret rampekryds	0	84
Total	Antal kryds	4.967	4.348

Tabel 1 Oversigt over genererede kryds og efterbehandlede kryds fordelt på krydstype

Registrering af krydsdata

Ved hjælp af luftfoto og Google Streetview, er følgende oplysninger registrering for alle krydspolygoner:

- Om den genererede polygon omslutter hele krydset eller skal editeres.
- Om der er overensstemmelser mellem vejnet i modellen og på luftfoto.
- Krydstypen (Tabel 1)
- VejID fra LTM L2 vejnettet for tilfarten samt for frafarten, hvis vejen er dobbeltdigitaliseret samt vejnavn og oplysninger om tilfartens retning i forhold til verdenshjørnerne.
- Svingtypen og tilhørende antal vognbaner for tilfarten. Herunder om der er busbaner, bundne sving eller shunts i krydset/rundkørslen. Derudover registres delte spor for tilfarten.
- Om tilfarten er primær eller sekundære i krydset. Det primære og sekundære benyttes blandt andet til at fastlægge vigepligtsforhold i vigepligtskryds og er bestemmende for grøntiden i kryds med signalanlæg.
- Om der er fodgængerfelter, cykelsti eller cykelfelter i krydset.



Figur 12 Eksempel på kryds fra COWIs luftfoto for år 2010

Delte spor

Det er af stor betydning for kapaciteten i de enkelte kryds om flere svingbevægelser deler samme spor, da de derved påvirker hinanden. En grundlæggende forudsætning i modellen er dog, at den regner med at hver svingbevægelse har sit eget spor, og derved ikke inddrager den kapacitetsforringelsen det medfører hvis der både afvikles ligeud og højre svingende køretøjer i samme bane.

At hver svingbevægelse har sit eget spor, er en grov antagelse og er ad flere omgange blevet diskuteret med Vejdirektoratet og DTU Transport i forbindelse med udarbejdelsen af krydsdatabasen. Muligheden for at bruge justeringsfaktoren $CapaAdjust$ til at reducere kapaciteten i de delte spor er blevet diskuteret, men forkastet, da kapaciteten for de forskellige svingbevægelser er afhængig af trafikmængderne.

Kapacitetsbegrænsningen bør derfor være dynamisk og afhængig af trafikmængderne på samme måde som modkørende trafik med vigepligt. COWI har herefter defineret 8 typer af delte spor og oprettet kolonnen SharLanTyp i turntypetabellen, hvor typen er registreret. Herved er det muligt senere at inddrage disse data i modellen, når den bliver videreudviklet til også at kunne tage højde for kapacitetsforringelser pga. delte spor, uden at der derved skal laves et større registreringsarbejde igen.

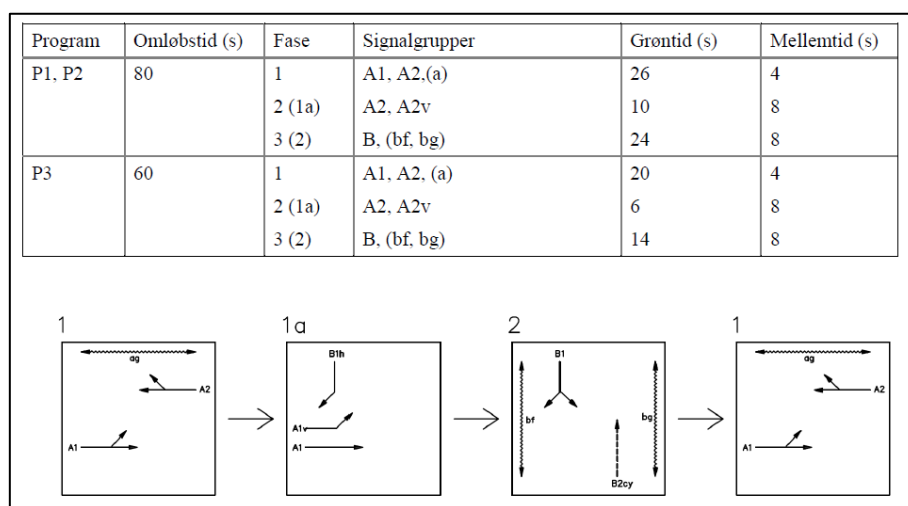
Signalplaner

Den oprindelige tanke i Vejdirektoratets oplæg var at indhente de faktiske signalplaner for alle signalkryds. COWIs Erfaring fra et tidligere projekt med vurdering af trængsel i Københavns Kommune viste dog at det ikke var praktisk muligt at indsamle opdaterede signalplaner for alle kryds. Vejdirektoratet besluttede derfor i samarbejde med COWI i stedet at arbejde med en række standardiserede signalplaner med data for grøntider, kapacitet og omløbstider, for forskellige typer af signalreguleret kryds så som rampekryds og mere eller mindre komplekse kryds.

Det vil derudover ikke altid være muligt at oversætte alle signalplaner til en entydig signalplan da en stor del er trafikstyret og de enkelte faser kan have forskellig længde afhængig af, om f.eks. et forgængersignal er aktiveret eller om en bus har meldt sin ankomst. Hvis der er fejl på en detektor, vil signalet ofte skifte til et nødprogram, hvor alle faser aktiveres i hvert omløb. Alle situationer der er svære at indarbejde i modellen og vil komplicere den yderligere. Samtidig vil der være tale om et øjebliksbillede som ville blive opbygget, og da signalerne løbende stilles om for at tilpasse til den aktuelle situation med ændrede trafikmængderne vil det fremadrettet kræve et meget omfattende vedligeholdelsesarbejde for at holde modellen opdateret, og vores erfaring er, at signalplaner i nogle kommuner kan være svært tilgængelige.

De mange signalanlæg er opdelt i følgende grundtyper; T-kryds, F-kryds (firevejskryds), rampekryds og signalregulerede rundkørsler. T-kryds og F-kryds, er defineret ud fra antal af tilfarter i krydset, hvor rampekryds og signalregulerede rundkørsler er udpeget manuelt. Der er opstillede standardiserede signalplaner med kapacitet, grøntider og mellemtid i og uden for myldertidsperioden for de primære og sekundære veje.

De standardiserede signalplaner for T-kryds og F-kryds er i princippet den samme, det eneste der adskiller dem er antallet af faser til at afvikle trafikken. T-krydsene afvikles med 2-3 faser, hvor der afhængigt af trafikmængderne er mulighed for fast indkobling af svingende trafik, eks. højresvingspil.



Figur 13, Eksempel af den standardiserede signalplan for T-kryds med 3 faser.

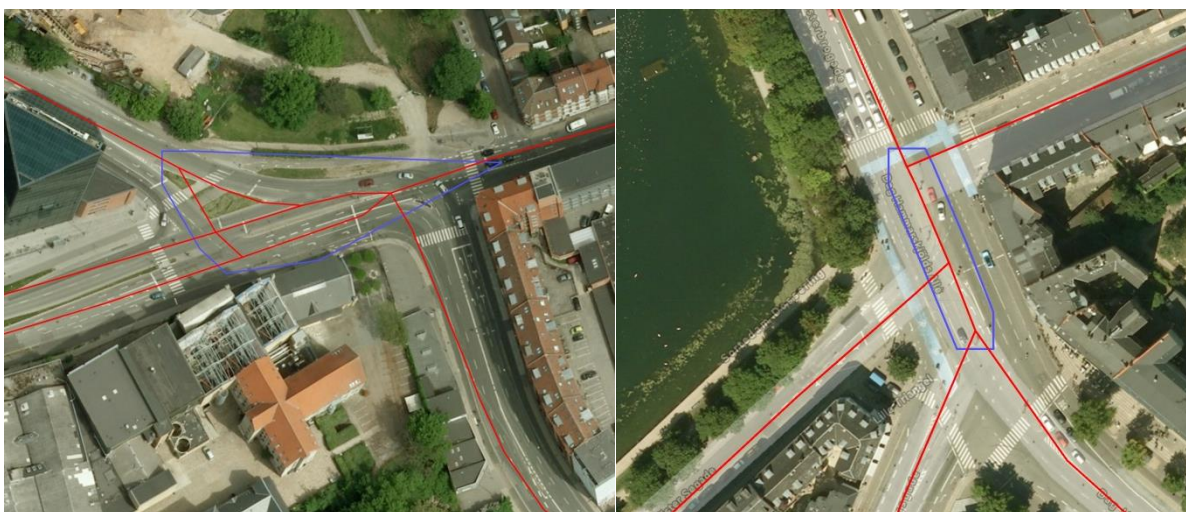
Specielle kryds

I modellen forekommer der en del kryds som ikke er standard kryds, som almindelige T-kryds og F-kryds. Geometri med mange tilfarter i et kryds og afvikling af større trafikmængder via bundne sving, gør en del af

krydsene specielle i forhold til at definere signalplaner og grøntider.

For komplicerede kryds, hvor der er bundne sving fra en eller flere tilfarter, er grøntiderne anderledes, da de bundne sving betyder at nogle grøntider bliver forlænget, mens andre bliver forkortet. Hvis der f.eks. er et bundet venstresving fra en af tilfarterne vil de modkørende i krydset få forkortet deres grøntid, mens de ligeud kørende fra samme tilfart vil kunne få forlænget deres grøntid.

I kryds med bundne sving fra flere retninger samt både bundne højre og venstresving er der stor forskel på hvor lang grøntid de enkelte svingbevægelser har. Ud fra registreringerne af primær- og sekundærretningerne samt bundne sving er krydsene opdelt i 18 forskellige typer. For hver af disse krydstyper er der lagt grøntider ind på svingbevægelserne alt efter svingtype, primær-/sekundærretning, om der er tale om bundne sving eller ej og deres relation til de andre bundne sving i krydset.



Figur 14 Billeder af specielle kryds i Aarhus og København

Kontrol af krydsdata

Ved autogenerering af sving antager krydsgenereringsværktøjet en række oplysninger om krydset, herunder typen af sving, der er i krydset ud fra krydsets geometri. Disse antagelser holder dog langt fra stik i alle kryds, da vejenes fysiske udformning gør, at et sving, der rent geografisk er et venstresving sagtens kan være ligeud retningen. Specielt for vigepligtskryds er det altafgørende, hvilken en svingtype der reel er tale om, da ligeud kørende fra en primærvej ikke har vigepligt for andre, mens et venstresving har. Der er mange steder i modellen, hvor geometrien gør, at krydsgenereringsværktøjets antagelser er forkerte, og disse er kontrolleret i en database. Under kontrollen er der udført følgende tests:

- Kryds uden sving:
Kryds hvor der mangler sving er fundet ved at undersøge sammenhæng/relation mellem Kryds ID i Intersectionstabellen og turntabellen. Disse kryds er derefter manuelt gennemgået.
- Sving, men intet kryds:
Krydsgenereringsværktøjet har flere steder genereret sving, der ikke tilhører en krydspolygon. Disse er i Access søgt ud og herefter manuelt gennemgået og slettet i modellen.
- Flere af samme sving:
Grundet autogenerering, er der steder i modellen, hvor et i realiteten ligeud "sving", grundet kurvet geometri i stedet er blevet genereret som et højre eller venstre sving. Ved at undersøge om tilfarten til et kryds har flere af samme type sving er disse fundet. Alle kryds med flere af samme type sving i én tilfart er derefter manuelt gennemgået og svingtypen eller krydsdata rettet til. Dog er der kryds med mange svingmuligheder, hvor det ikke er en fejl, at der er flere af samme sving fra tilfarten.
- Manglende sving:
Grundet digitaliseringsfejl eller autogenerering af svingtypen, er der kryds, hvor der i forhold til registreringerne mangler sving fra en tilfart i modellen. Denne kontrol overlapper delvist kontrollen af flere af samme type sving. VejlID'er med manglende sving er manuelt gennemgået og

digitaliseringen, svingtypen eller krydsdata rettet til, så modellens svingoplysninger og krydsdata stemmer overens.

Validering af krydsforsinkelser

Efter at alle inddata er oprettet og grøntider osv. i signalkryds er indarbejdet i modellen er der gennemført en række modelberegninger for at validere det indlagte data ud fra de beregnede krydsforsinkelser.

Kryds med høje forsinkelse på det enkelte sving, blev tjekket for fejl i inputdata. Her blev der fundet kryds med forkert krydstype og enkelte kryds, hvor udstrækningen af krydset var forkert, hvorefter krydspolygonen blev rettet til. F.eks. blev en krydspolygon indsnævret således at drejebanen, udformet som en shunt, blev friholdt af krydset og derfor ikke havde en begrænset på afvikling af trafikken.

Ved tjek af de høje svingforsinkelser er der ud over forkert krydstype tjekket for andre fejl i inputdata. Der er rettet på svingtypen for enkelte sving på baggrund af vejnettets udformning, f.eks. har der været defineret svingbevægelser til højre eller venstresvingende, men som i krydset er ligeud gående. Dernæst er kapacitet, turnpriority, antallet af vejbaner, turn allowed, primær/sekundær retning. Ved høje svingforsinkelser, hvor der ikke er fundet nogle fejl eller mangler i inputdata, er grøntiden efterfølgende justeret i krydset for at sænke forsinkelsen. Ved efterfølgende beregninger er udviklingen af forsinkelsen på sving med høje forsinkelser fulgt og brugt til at justere eller ændre inputdata tilbage således at de høje forsinkelser for alle svingbevægelser i krydset er kalibreret.

Dataomfang

Ved integrering af krydsdatabasen i landstrafikmodellen udvides mængden af vejnetsdata betragteligt. Landstrafikmodellen består af ca. 30.000 vejnetskanter og med krydsdatabasen øges mængden af data betragteligt, med følgende:

- 4.348 kryds.
- 32.289 sving. Kryds beskrives ved hjælp af sving, som yderligere beskrives af vigepligter og svingdetaljer.
- 39.416 rækker med data for vigepligter i dutiestoyield tabellen.
- 56.765 rækker for svingdetaljer, med data for eksempelvis svingforbud, antal spor, grøntider og kapacitet i tabellen turndetails.
- 142.076 rækker for TurnDetailValidity, som beskriver hvilke svingdetaljer der er forbundet med modellens 10 tidsperioder.

Konklusion

Overordnet set vil krydsmodellering være en klar forbedring af Landstrafikmodellens evne til at modellere trængsel. Dette skyldes dels, at forsinkelserne i kryds og på strækninger bliver beregnet separat og trafikanterne derved opnår en mere realistisk forsinkelse afhængigt af rutevalg. Derudover vil modelberegningerne i forbindelse med indførelse af krydsberegninger blive opdelt i 10 tidsperioder, som muliggør en langt bedre modellering af trængslen i myldretiderne. Ud over at den generelle belastning på vejnettet er højere i myldretiden er der også en markant retningsopdeling af trafikken specielt i og omkring de større byer. Begge dele bidrager til en større trængsel end ved en døgnberegning, hvor trafikken er symmetrisk.

Potentielt kan indførelse af modellering af kryds, samt opdeling i 10 tidsperioder have en negativ indflydelse på den samlede regnetid for modellen. Derfor arbejdes der også intenst på at optimere beregningstiderne i forbindelse med indarbejdelsen af krydsmodellering, så det samlede set ikke vil få den store indflydelse på den samlede beregningstid.

Ud over en mulig forøgelse af beregningstiden er en anden ulempe ved indarbejdelse af krydsmodellering at der bliver et større vedligeholdelsesarbejde i forbindelse med opdateringer samt ved opstilling af scenarier. Det vil ikke mere være nok blot at tilføje nye vejstrækninger, der skal også indlægges oplysninger

om svingbevægelser, grøntider osv. i nye kryds, samt evt. redigeres i eksisterende kryds. Ved hjælp af effektive redigeringsværktøjer burde dette dog kunne afhjælpes til en vis grad.

Effekter i modellen

Inddragelse af krydsforsinkelser i Landstrafikmodellen påvirker rutevalget og den samlede rejsetid, da den indtil nu kun har bestået af rejsetiden på strækninger.

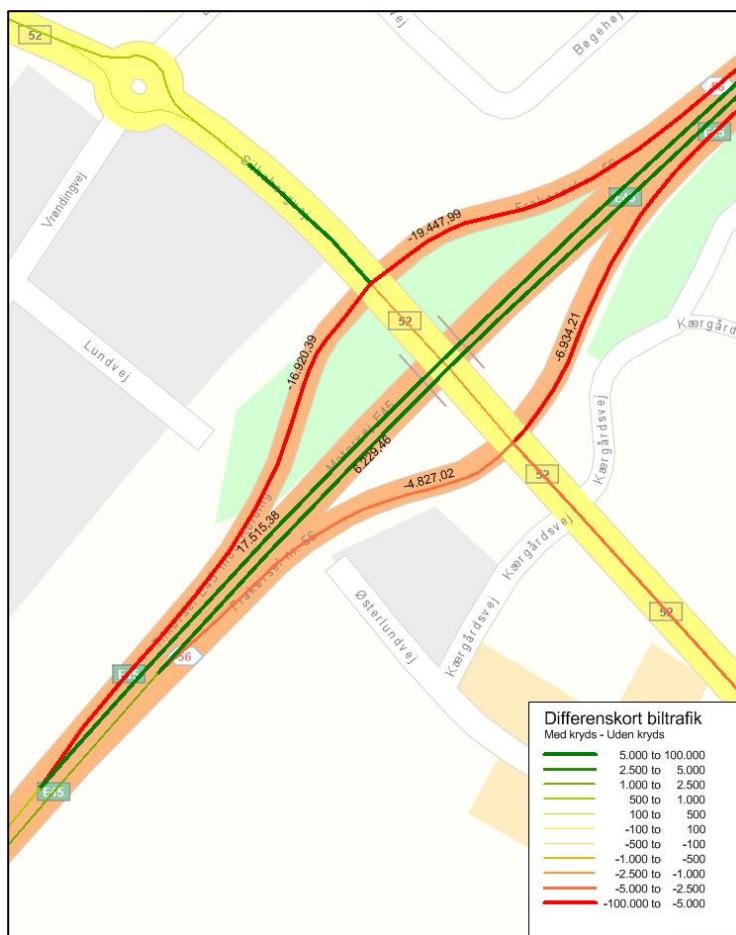
Overordnet forventes følgende effekter ved indførelse af krydsforsinkelser:

- En forøgelse af den ekstra rejsetid som skyldes trængsel
- Et fald i trafik på sekundær-veje som krydser primærveje
- En stigning i trafikken på og langs primærveje
- En generel flytning af trafik fra landeveje til motorveje
- Forbedring i lokale detaljer – f.eks. kan der i Landstrafikmodeller uden kryds være problemer med trafikanter som kører op og ned ad motorsvejsramper

I forbindelse med validering af krydsdata var det muligt at se en del af de forventede effekter. Lokale ændringer i rutevalget var meget tydelige. Problemet med at trafikanterne benyttede motorvejsramperne i stedet for motorvejen på steder med trængsel blev generelt løst i hele vejnettet. Et eksempel på dette er ved afkørsel 56 Horsens V på E45, hvor trafikken på ramperne blev ændret markant ved inddragelse af krydsforsinkelser i modellen.

Også andre steder i modellen var det tydeligt at inddragelse af krydsforsinkelser havde en effekt. Dette var bl.a. tydeligt på Åboulevarden i København, hvor den krydsende trafik blev stærkt begrænset i forhold til en modelkørsel uden krydsforsinkelser.

En anden positiv effekt ved inddragelse af kryds i modellen er at det nu er blevet muligt at lave svingforbud, hvilket har stor betydning for rutevalget især i byområderne.



Figur 15: Ændret rutevalg på motorvejsramper som følge af inddragelse af krydsforsinkelser. E45, afkørsel 56 Horsens V.

Perspektiver

Både på data-, værktøjs- og modelsiden sker der en videre udvikling med hensyn til krydsmodellering i Landstrafikmodellen.

På datasiden er arbejdet pt. i gang med at integrere de opstillede kryds-data med det nyeste Landstrafikmodel-vejnet. Herefter følger en kalibreringsfase.

På værktøjssiden sker der en løbende udvikling af redigerings- og visualiseringsværktøjerne. Pt. arbejdes der på at indarbejde kryds-data i den scenarie-styring af data som Traffic Analyst understøtter, og som anvendes i Landstrafikmodellen. Desuden fokuseres der på, at tilføje en produktion af automatisk

visualisering af rejsetider og trafikstrømme på detaljeret kryds-niveau, da dette vil være en hjælp i forbindelse med kalibreringsarbejdet.

Endelig har der på modellsiden været udført et arbejde med at forbedre modelleringen af delte spor, samt trafikstyrede kryds. Effekten og kapacitetsbegrænsningen af delte spor beregnes p.t. ikke detaljeret i modellen men der tages højde for dette ved at indsætte en koefficient som bruges til at reducere den beregnede kapacitet af en svingbevægelse, også for cyklister og fodgængere i krydsene mv. I forbindelse med kalibreringen af den udvidede vej-rutevalgmodel, vil der formodentligt skulle arbejdes videre med kryds-modellerne – f.eks. kan det være, at der i udvalgte kryds skal arbejdes med at anvende en modellering på 4 15-minutters intervaller, i stedet for 1 gennemsnitlige model-time.

Referencer

Traffic Analyst Manual v. 3.9 (Rapidis ApS, maj 2014)

Vejregelforslag, Trafikteknik – Kapacitet og Serviceniveau (Vejdirektoratet, september 2010).

Highway Capacity Manual, TRB (1994, 2000, 2010).

F. V. Webster: *Traffic Signal Settings* (Road Research Technical Paper No. 39, Road Research Laboratory, 1958)

J. Harder: *Die Leistungsfähigkeit nicht signalgeregelter städtischer Verkehrsknoten* (Fakultet für Bauwesen, Technischen Hochschule Hannover, 1968)

J. Harder: *Grenz- und Folgezeitlück als Grundlage für die Berechnung der Leistungsfähigkeit von Landstrassen* (Forschungsberichte, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 216, Bonn - Bad-Godesberg, 1976)

Nikolaj Simonsen & Rasmus Dyhr Frederiksen: *Modellering af kryds i biltrafikmodeller - GIS-baseret SUE-trafikudlægning med krydsmodeller* (DTU: IFP, december 1996)