

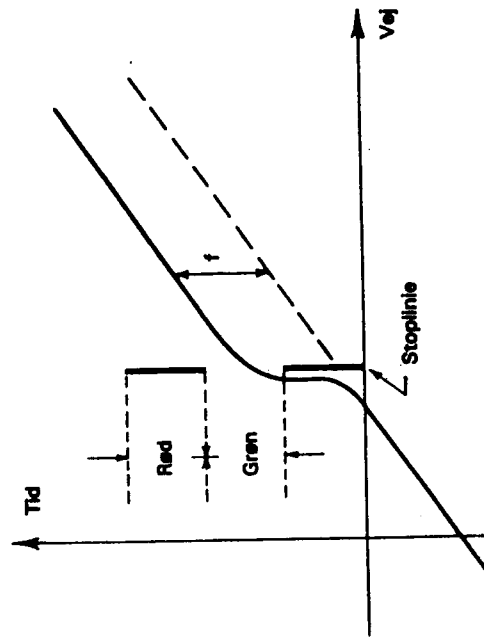
Fuld udnyttelse af kapaciteten forudsætter imidlertid, at der er en konstant kø af biler i tilfarten parat til at køre ind i krydset. Dette vil imidlertid ikke af trafikantene blive opfattet som et tilfredsstillende serviceniveau. Dog må nogle trafikanter i tæt trafik acceptere at skulle vente mere end ét omløb en gang i mellem, fordi antallet af ankomende biler varierer fra omløb til omløb.

## Forsinkelse

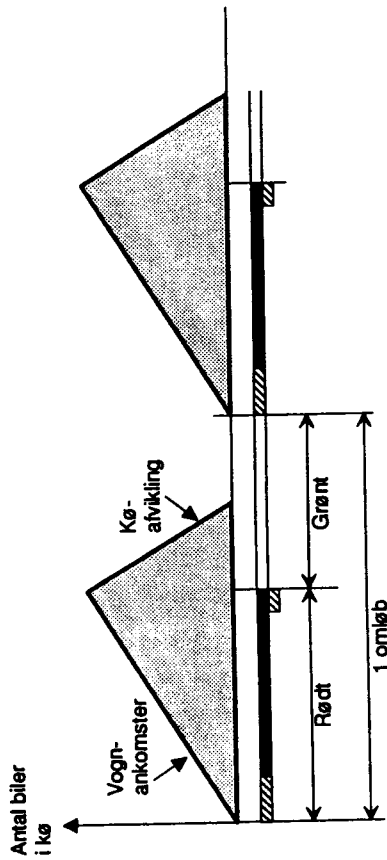
En væsentlig gene for trafikanterne i et signalanlæg er risikoen for ventetid på grund af rødt lys. Forsinkelsen for en trafikant defineres som forskellen i rejsetid ved uforstyret passage af krydset og den faktiske rejsetid jf. figur 5.8.

Et formelapparat til beregning af forsinkelsen for køretøjerne i et signalreguleret kryds blev udviklet af englænderen Webster i 1950'erne. Webster betragtede et signalanlæg som et køsystem med poissonfordelte kundeankomster og betjeningsstider (køretøjsankomster og afviklingstid pr. køretøj). Det specielle ved et sådant køsystem er, at betjeningsstedet åbner og lukker med jævne mellemrum (signalet skifter mellem grønt og rødt, idet der er set bort fra gult).<sup>3</sup>

I en situation, hvor et sådant køsystem er i ligevægt, dvs. anlægget er i stand til at afvikle den ankomende trafik uden en stadigt voksende kø, vil køen ved stoplinien vokse fra nul ved rødperiodens begyndelse, til den når sit maksimum ved den efterfølgende grønperiodes begyndelse jf. figur 5.9. På dette tidspunkt vil der holde  $N \cdot R$  køretøjer i køen, hvor  $N$  er ankomstintensiteten og  $R$  er den del af omløbstiden, hvor der ikke er grønt ("rødtiden"). Nu begynder køen at aftage



Figur 5.8 Definition af forsinkelse i et signalanlæg.



Figur 5.9 Ankomster og afvikling ved en stoplinie med jævn ankomstfordeling.

med konstant hastighed, indtil den er helt forsvundet et stykke ind i grønperioden. Når  $K$  betegner grøntimekapaciteten, vil den intensitet, hvormed køen afvikles være  $K-N$ , da der jo stadig ankommer køretøjer med intensitet  $N$  til bagenden af køen, mens denne afvikles. Da køen ved grøntidens start er på  $NR$  og køen afvikles med en intensitet på  $K-N$ , vil der gå tidsrummet  $NR/(K-N)$ , før køen er helt afviklet.

Den samlede forsinkelse  $F$  er lig med arealet under ankomst- og afviklingskurven og kan beregnes til

$$F = \frac{1}{2} NR \left( R + \frac{NR}{K-N} \right) = \frac{KNR^2}{2(K-N)} \quad (5.2)$$

$N$ : ankomstintensiteten

$R$ : rødtiden

$K$ : grøntimekapaciteten

Med en ankomstintensitet på  $N$  ankommer i løbet af ét signalomløb  $NC$  køretøjer. Den gennemsnitlige forsinkelse pr. køretøj ved jævn ankomstfordeling er da:

$$f = \frac{F}{NC} = \frac{KNR^2}{2(K-N)} \cdot \frac{1}{NC} = \frac{KR^2}{2C(K-N)} \quad (5.3)$$

Trafikken mod et fritliggende signalanlæg ankommer imidlertid ikke jævnt fordelt men derimod tilfældigt fordelt i tid (poissonfordelt). Disse tilfældige ankomsters bidrag til forsinkelsen stiger, jo nærmere trafikintensiteten er på kapacitetsgrænsen.

Kapacitetsudnyttelsen (belastningsgraden) for strækninger beregnes som forholdet mellem trafikintensiteten og kapaciteten ( $N/N_{\max}$ ). I signalregulerede kryds er kapaciteten lig med grøntimekapaciteten  $K$  reduceret med grøntidsandelen  $g/C$ , hvorfor kapacitetsudnyttelsen kan skrives som:

$$b = \frac{N}{N_{\max}} = \frac{N}{K} \cdot \frac{NC}{g} \quad (5.4)$$

Englænderen Webster opstillede ud fra (5.3) og (5.4) følgende formel for den gennemsnitlige forsinkelse pr. køretøj (Websters formel):<sup>3</sup>

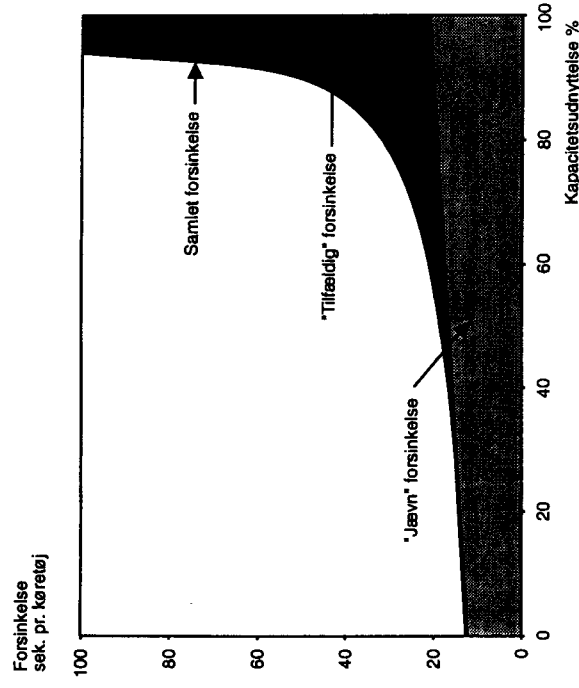
$$f = 0,9 \cdot \left[ \frac{KR^2}{2C(K-N)} + \frac{3600b^2}{2N(1-b)} \right] \quad (5.5)$$

- f: gennemsnitlig forsinkelse pr. køretøj (sek)
- b:  $NC/Kg$  er kapacitetsudnyttelsen
- C: omløbstiden (sek)
- R: rødtiden  $C-g = C-(G+1)$  (sek)
- N: ankomstintensiteten (biler/h)
- K: grøntimekapaciteten (biler/h)

Den effektive grøntid,  $g$ , er ca. 1 sek større end den virkelige grøntid. Dette skyldes, at trafikanterne normalt udnytter 2-4 sek af gultiden før trafikken standser. Til gengæld er der et starttab i begyndelsen af grønperioden, inden trafikken strømmer frit over stoplinjen. Grøntiden  $G$  i Websters formel skal derfor regningsmæssigt være ca. 1 sek større end den virkelige grøntid, dvs.  $g = G+1$ .

Det første led i (5.5) er forsinkelsesbidraget fra en jævn ankomstfordeling. Det andet led er bidraget, der skyldes tilfældige ankomster. Webster fandt det nødvendigt med et matematisk kompliceret tredje korrektionsled med negativt fortegn. Dette tredje led reducerer forsinkelsen med 5-15 pct. Tilnærmelse kan denne reduktion derfor udtrykkes ved faktoren 0,9 i (5.5). Forsinkelsen pr. køretøj i en signaltilfart er optegnet i figur 5.10.

Det er vigtigt at gøre sig klart, at forudsætningen for anvendelse af Websters forsinkelsesformel er, at køretøjerne ankommer tilfældigt til krydsets tilfarter. Beregningsmetoden bør derfor ikke anvendes ukritisk for anlæg, der indgår i en samordning med andre signalanlæg, hvor køretøjerne i én eller flere tilfarter derfor ankommer opdelt i grupper.



Figur 5.10 Forsinkelsen vokser ifølge Websters formel meget hurtigt, når kapacitetsudnyttelsen nærmer sig 1,0. Forudsætninger:  $C=60$  sek,  $R=42$  sek,  $K=180C$  kt/h.

## 5.6 Beregning af tidsstyret signalanlæg

### Beregning af omløbstid

Tidsstyrede signaler dvs. med konstant omløbstid benyttes normalt kun i forbindelse med samordnede signalanlæg. Den omløbstid, der vælges, har som tidligere nævnt betydning for anlæggets kapacitet og dermed for trafikanternes ventetider. Biltrafikken stiller krav om valg af en omløbstid, der minimerer den gennemsnitlige forsinkelse, mens fodgængerne stiller krav om så korte omløbstider som muligt for at minimere den maksimale ventetid.

Spørgsmålet er nu, hvilken omløbstid, der skal vælges for at trafikanternes ventetid bliver mindst muligt, når trafikken ankommer tilfældigt.

Det er ikke muligt udfra (5.5) at opstille en generel formel for den optimale værdi af omløbstiden. Webster har midlertid påvist, at man opnår en god tilnærmelse ved at benytte følgende formel:

(5.6)

$$C_{\text{opt}} = \frac{1,5k + 5}{1 - \sum \frac{N_i}{K_i}}$$

k: tabt tid ved faseskift ("summen af mellemtider")

$N_i$ : den største belastning i fase nr. i

$K_i$ : den tilhørende grøntimekapacitet

For et 2-faset signalanlæg kan (5.6) skrives som:

(5.7)

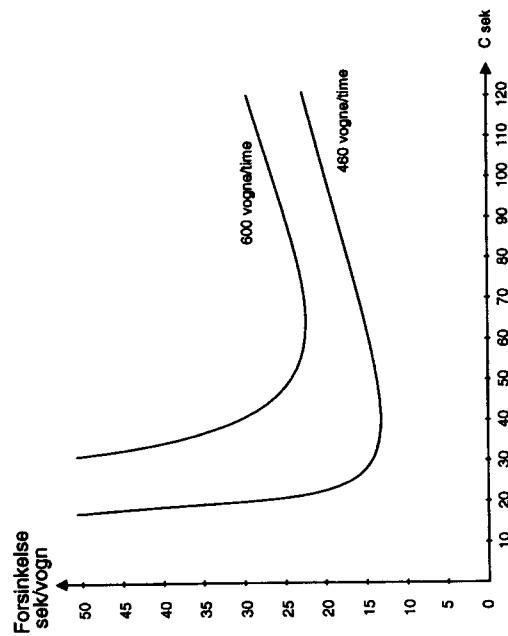
$$C_{\text{opt}} = \frac{1,5k + 5}{1 - \frac{N_1}{K_1} - \frac{N_2}{K_2}}$$

k: tabt tid ved faseskift

$N_1$  og  $N_2$ : den største trafikintensitet på de skærende veje

$K_1$  og  $K_2$ : den tilhørende grøntimekapacitet på de skærende veje

Sammenhængen mellem omløbstid og forsinkelse er illustreret i figur 5.11. Forsætningen for figuren er samme grøntid (0,5C-5) i de to retninger og samme grøntimekapacitet (1800 køretøjer/h). Det fremgår, at forsinkelsen er relativt større ved for små omløbstider end ved store. Ud fra et samlet ventetidssynspunkt, skal man derfor hellere vælge en lidt for stor end en lidt for lille omløbstid. Det ses, at der er et område omkring den optimale omløbstid, hvor kurven er relativt flad. Det gør derfor ikke så meget, at den aktuelle omløbstid afviger lidt fra den optimale.



Figur 5.11 Sammenhæng mellem omløbstid og forsinkelse.

Ved samordnede signalanlæg beskrevet senere i afsnit 5.8 benyttes den samme omløbstid for alle de signalanlæg, der indgår i samordningen. Der vælges da en omløbstid, som passer til det mest belastede kryds. Formel (5.6) kan benyttes hertil, selvom forudsætningen om poissonfordelte ankomster strengt taget ikke er opfyldt for de indre vejstrækninger i en samordning.

Lange omløbstider (over 80 sek) skal så vidt muligt undgås, fordi det samtidig medfører lange rødtider, der virker stærkt generende på specielt cyklister og fodgængere, med risiko for at signalerne ikke respekteres.

## Beregning af grøntiden

Når signallets omløbstid er beregnet, fordeles den til rådighed værende grøntid proportionalt med de største trafikmængder i tilfarterne for hhv. hovedretningen og sideretningen.

Hvis man skal have beregnet grøntiden i et signalanlæg, der indgår i en samordning med kendt omløbstid, hvor en sideretning blot skal have tildelt den mindst mulige grøntid af hensyn til prioritering af en hovedretning, er det tilstrækkeligt at beregne den nødvendige grøntid. Dette kan gøres ud fra en sandsynlighedsbetragtning.

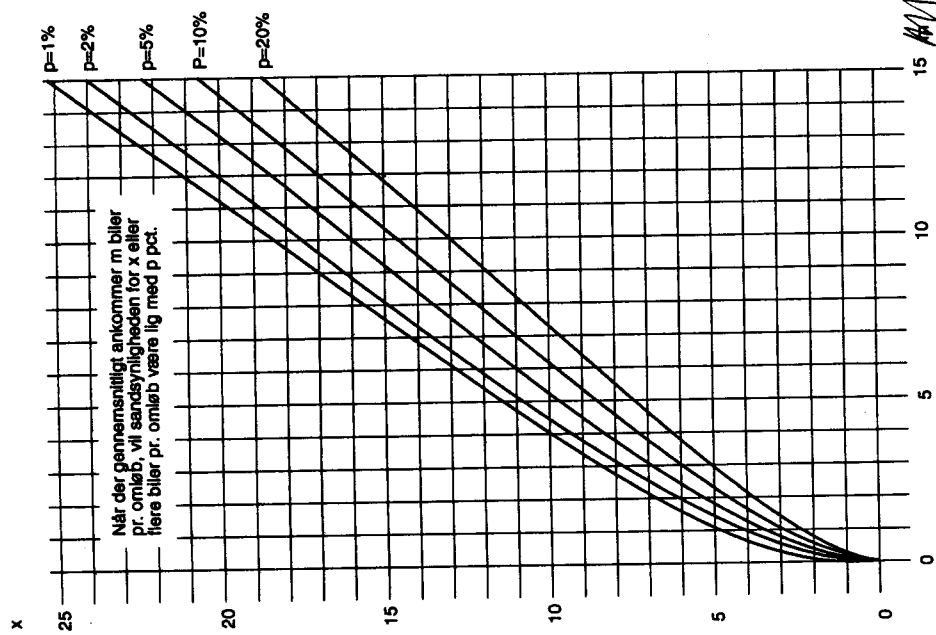
På figur 5.12 ses, hvor mange køretøjer ( $x$ ), der kan forventes at ankomme med forskellige sandsynligheder, når køretøjerne ankommer poissonfordelt med et gennemsnit på  $m$  køretøjer pr. omløb. Normalt sættes risikoen for overbelastning til 20 procent. Hvis der fx ankommer  $m = 5$  pbe i en tilfart med ét spor ses af figur 5.12, at der med en sandsynlighed på 20 procent vil ankomme  $x = 8$  eller flere biler. Med en grøntimekapacitet på 2000 pbe/time (1,8 sek pr. pbe) skal grøntiden for denne tilfart derfor sættes til minimum  $8 \cdot 1,8 = 14$  sek. Hvis trafikintensiteten inden for dele af spidstimen er væsentlig højere, bør trafikintensiteten i dette tidsrum benyttes som dimensioneringsgrundlag.

Eksempel på beregning af et kryds

I et kryds, der skal signalreguleres med 2 faser med mellemtider på hhv. 6 og 8 sek, er der i en spidstime registreret følgende trafikmængder omregnet til personbilenheder, som vist på figur 5.13.

Beregning af omløbstid

Der kan regnes med en grøntimekapacitet for ligeudsporene i hovedretningen på  $K = 2000$  pbe/grøntime (1,8 sek pr. pbe). På sidevejen er det dimensionsgivende spor et blandet ligeud/højrespor. De højresvingende fra sidevejene skal vige for ligeudkørende cyklister og krydsende fodgængere over hovedretningen. Dette reducerer kapaciteten fra sidevejen til skønsmæssigt 1600 pbe/grøntime (2,25 sek pr. pbe).



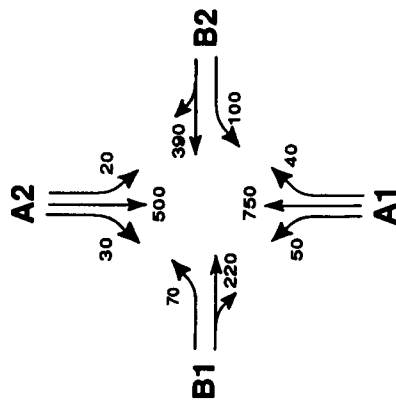
Figur 5.12 Diagram med sandsynligheden for antal køretøjsankomster ved forskellige ankomstintensiteter i en poissonfordeling.

De dimensionsgivende tilfarter i hoved- og sideretningen ses at være A1 og B2.

For A1 er  $N_1/K_1 = 750/2000 = 0,375$

For B2 er  $N_2/K_2 = 390/1600 = 0,244$

Den tabte tid pr. omløb k udgøres af summen af mellemtider minus nettogevinsten ved at trafikantene fortsætter med at køre et stykke inde i gulperioden (1 sek pr. fase). Da mellemtiderne er på 6 og 8 sek, er k lig med 12 sek, og den optimale omløbstid kan ifølge (5.7) beregnes til:



Figur 5.13 Ved dimensionering af signalanlæg opgøres trafikintensiteten for hver signaltilfart i en spidstid.

$$C_{opt} = \frac{1,5 \cdot 12 + 5}{1 - 0,375 - 0,244} = 60 \text{ sek} \quad (5.8)$$

Fratrækkes mellemtiderne, i alt 14 sek er der 46 sek grøntid til fordeling mellem hovedretningen A1/A2 og sideretningen B1/B2.

#### Beregning af grøntider

I alt er der  $750 + 390 = 1140$  pbe, der skal konkurrere om de 46 sek grøntid.

Grøntiden fordeles proportionalt med trafikintensiteten:

Grøntiden for A1/A2 beregnes til:  $46 \cdot 750/1140 = 30$  sek

Grøntiden for B1/B2 beregnes til:  $46 \cdot 390/1140 = 16$  sek

Ved det endelige valg af grøntider skal man sikre sig, at fodgængernes krav til minimumgrøntider er opfyldt.

#### Beregning af forsinkelser

For A1-retningen i figur 5.13 er:

$K = 2000$  pbe pr. time

$N = 750$  pbe pr. time

$R = C - g = C - (G + 1) = 60 - 31 = 29$  sek

$b = NC/Kg = 750 \cdot 60/2000 \cdot 31 = 0,726$

Den gennemsnitlige forsinkelser pr. køretøj for ligeudkørende i retning A1 kan herefter bestemmes ifølge (5.5):

$$f = 0,9 \cdot \left[ \frac{2000 \cdot 29^2}{2 \cdot 60 \cdot (2000 - 750)} + \frac{3600 \cdot 0,726^2}{2 \cdot 750 \cdot (1 - 0,726)} \right] = 14 \text{ sek} \quad (5.9)$$

på tilsvarende vis kan forsinkelserne for trafikanterne i de andre retninger beregnes.

I vejreglen for vejryds i åbent land er serviceniveaubegrebet defineret ud fra forsinkelsen for den enkelte trafikant på den i tabel 4.6 viste måde. Denne definition kan også anvendes i signalregulerede kryds.

## 5.7 Trafikstyring

Ved trafikstyring forstås, at køretøjernes ankomster i de enkelte signaltilfarter styrer varigheden af det grønne signal. Trafikstyring anvendes især på steder, hvor trafikken ankomstfordeling er tilfældig, dvs. på steder hvor der ikke er andre signalanlæg i nærheden, der sender køretøjer i grupper hen mod det aktuelle kryds.

Fordelen ved trafikstyring er, at grøntiden hele tiden tilpasses det aktuelle behov. Dette medfører i princippet, at trafikanterne ikke skal holde, uden at der er trafik i tværretningen. Af Danmarks ca. 2.700 signalanlæg (i 1992) er ca. 1.500 trafikstyrte.

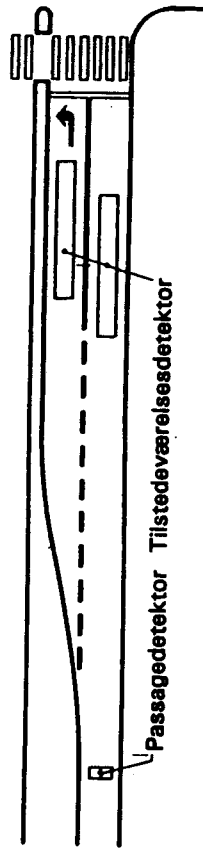
### Detektorer

Trafikstyring sker ved hjælp af detektorer, der er nedfræset i asfalten eller lagt, inden vejen er forsynet med et slidlag. En detektor er en elektromagnetisk spole, hvorigennem der løber en svag strøm. Når metallet fra et køretøj passerer spolen, induceres en strøm, der af styreapparatet tolkes som et køretøjs passage eller belægning af den pågældende detektor. Fodgængere detekteres med trykknapper.

Detektorer i en signaltilfart kan have forskellig funktion og udstrækning afhængig af, om det er køretøjer eller cykler, der skal detekteres samt, hvor forfinet og avanceret styringen skal være. På figur 5.14 er vist udformningen og placeringen af en passagedetektor og to tilstedeværelsesdetektorer i en signaltilfart.

### Hvilestilling. Trafikstyring i grupper

Kryds med detektorer i alle tilfarter benævnes fuldt trafikstyrte, mens kryds, hvor der kun er detektorer i sidevejen benævnes sidevejstrafikstyrte anlæg. I fuldt trafikstyrte anlæg tilpasses grøntiden trafikens ankomster i de to retninger. Trafikstyrte anlæg har hidtil fungeret på den måde, at anlægget, efter at al trafik fra sidevejen er afviklet, automatisk skifter tilbage til grønt lys for hoved-



Figur 5.14 Trafikstyrte signalanlæg har detektorer i tilfarterne for at registrere om en retning skal have grønt lys, eller om det grønne lys skal forlænges.

retningen. Denne tilstand kaldes hvilestillingen. En hvilestilling med grønt lys i hovedretningen benævnes også "præference".

Særligt i højhastighedsanlæg, hvor trafikanterne kører mere end 70 km/h bliver det dog mere og mere udbredt at benytte "alt rødt" som hvilestilling, dvs. alle signaler i anlægget viser rødt, indtil der kommer et krav om grønt lys fra en detektor i én af tilfarterne (anmeldelse) eller fra en fodgængertrykknop. Signalet skifter herefter til rødt/gult og grønt for denne fase, så trafikanter i tynd trafik kan fortsætte gennem krydset uden at skulle stoppe men evt. med en hastighedsnedsættelse som følge. Erfaringerne viser da også, at anlæg med "alt rødt" kan have en hastighedsdæmpende effekt.

Især i tynd trafik yder trafikstyrte signalanlæg en høj service til trafikanterne, fordi det næsten altid er muligt at passere krydset med ingen eller med lille forsinkelse. I tæt trafik kan et anlæg med mange faser med fordel trafikstyres, fordi de enkelte faser eller signalgrupper kun tildes den grøntid, de har behov for. Dette forøger kapaciteten.

### Forlængelse af grøntiden

Normalt findes der mindst to detektorer i hver tilfart. Hvad der helt konkret sker, når en detektor bliver belagt, afhænger af styrealgoritmen for det trafikstyrte anlæg og de funktioner, der er tildelt hver enkelt detektor. Der skelnes mellem detektorfunktionerne anmeldelse, forlængelse og tilstedeværelse.

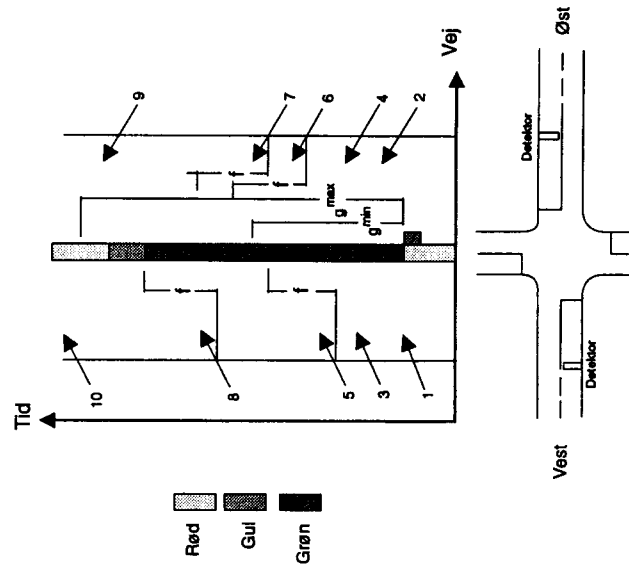
Hvis en trafikant nærmer sig krydset fra sideretningen i en situation, hvor anlægget står med grønt i hovedretningen, vil køretøjet på et tidspunkt passere den yderste detektor. Herfra vil der gå en besked til styreapparatet, om at sideretningen har behov for et signalskift fra rødt til grønt lys (anmeldelse). Inden sideretningen får grønt lys, vil anlægget dog først undersøge, om der er trafik på vej mod krydset i hovedretningen. Trafik herfra kan nemlig forlænge grøntiden med et forudbestemt antal sekunder (forlængelsestiden), hver gang en detektor i tilfarten passerer.

Grønt lys i hovedretningen kan opretholdes op til en fastsat maksimumværdi, så længe der til stadighed passerer køretøjer hen over en detektor i hovedretningen inden forlængelsen fra det foregående køretøj udløber. Princippet i denne form for grøntidsforlængelse er vist på figur 5.15, hvor der for overskuelighedens skyld dog kun er vist én detektor pr. tilfart.

Efter mellemtiden skiftes der til grønt lys for sideretningen. Efter udmåling af en fast grøntid (minimumgrønt) kan fasen for sideretningen så forlænges efter samme princip som for hovedretningen, hvis der kommer flere køretøjer fra sideretningen.

Traditionelt har man i Danmark placeret detektorer i hovedretningen i en afstand af ca. 70 m og 120 m fra stoplinien. Med en forlængelsestid på fx 3,2 sek og en afstand mellem de to detektorer på 50 m svarer dette til, at et køretøj, der kører hurtigere end 56 km/h, efter at have passeret den yderste detektor vil kunne nå frem til den næste detektor, som yderligere giver en grøntidsforlængelse på 3,2 sek.

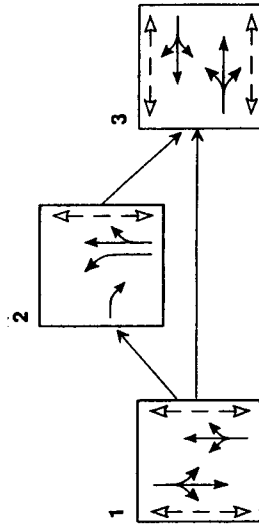
Hvis køretøjet netop kører med en hastighed af 56 km/h og det er det sidste forlængende køretøj, vil det møde gult lys 20 m fra stoplinien, hvorefter det uden problemer vil passere krydset for gult lys.



Figur 5.15 Princippet for grøntidsforlængelse. Grøntiden kan opretholdes så længe tidsafstanden mellem køretøjerne ikke overskrider forlængelsestiden, f.

## Overspring af fase

Det er også muligt at benytte køretøjers tilstedeværelse på en detektor i styrealgoritmen. I anlæg, hvor der periodevis ankommer mange venstresvingende afgøres det på et bestemt tidspunkt i omløbet, om køen er så lang, at der er behov for indkobling af en hjælpefase med en venstresvingepil (jf. figur 5.1b). Hvis ikke udelades hjælpefasen, og der kan gives yderligere grønt til den tilfart, der skulle være afkortet ved indkobling af hjælpefasen. Denne facilitet medfører en fassopbygning i hvert omløb, der hele tiden er afstemt antallet af venstresvingende, når en kø på detektoren viser, at der er behov for ekstra grøntid for venstresvingende jf. figur 5.16.



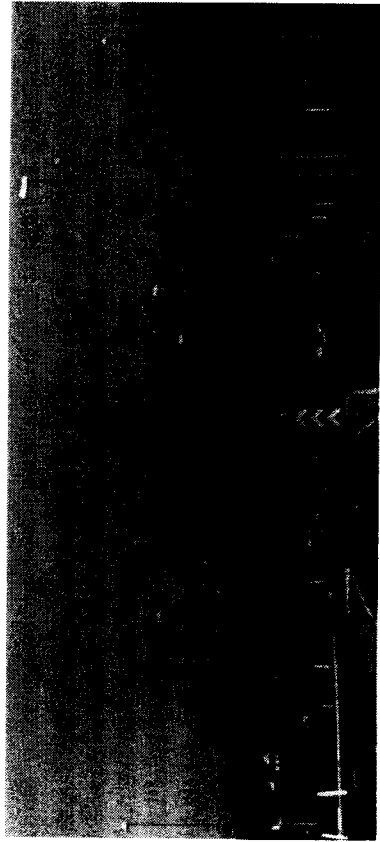
Figur 5.16 En tilstedeværelsesdetektor kan benyttes til at indkoble en hjælpefase, når en kø på detektoren viser, at der er behov for ekstra grøntid for venstresvingende.

## Moderne trafikstyring

Teknologiuudviklingen gennem 1980'erne har bevirket, at man ved ombygningen og nyetableringer i dag indbygger mere og mere sofistikerede funktioner i styringen af anlæggene. En svensk strategi benævnt LHOVRA (Vägverket, 1982, bliver hyppigt anvendt i Danmark ved ombygninger af signalregulerede kryds: åbent land men også ved anlæg med bynære omgivelser. I Danmark anvender v følgende LHOVRA-funktioner:<sup>4,5</sup>

- L: Lastbilsprioritering
- H: Hovedretningsprioritering
- O: Ulykkesreduktion
- R: Rødkørselskontrol (mellemtdsforlængelse)

I signalanlæg i åbent land er andelen af uheld med lastbiler overrepræsenteret. Med L-funktionen er der detektorer placeret i 300 m afstand fra krydset, som detekterer lastbiler, der kører over 60 km/h. Signalanlægget spærres herefter for al forlængelse til sideretningen, og lastbilen ledes på denne måde igennem under stop eller med så lille forsinkelser som mulig.



**Bundet venstresving forebygger venstresvingsulykker, men kan give lange ventetider.**

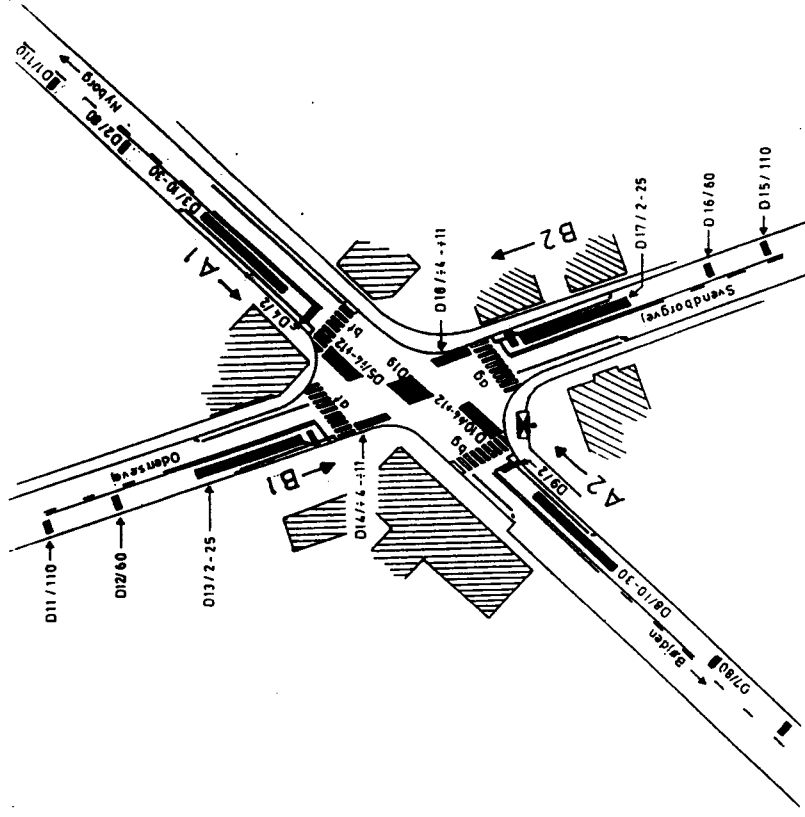
Hovedretningsprioriteringen medfører lidt større forlængelsestider pr. detektor-passage sammenlignet med traditionel trafikstyring. Dermed er det lettere for hovedretningen at opretholde grønt lys.

Antallet af bagendekollisioner er et problem i signalregulerede kryds, bl.a. fordi der sker mange pludselige stop, når signalet skifter fra grønt til gult. Hvis signalet skal til at skifte til gult, fordi den maksimale forlængelse er nået, og der stadig er køretøjer på vej mod krydset i en afstand af 50-140 m fra stoplinien tillades en ekstra grøntidsforlængelse. Med O-funktionen reduceres således sandsynligheden for, at signalet skifter til gult, når køretøjer er i denne afstand fra krydset, og trafikanten derfor har svært ved at træffe valget mellem at stoppe og at fortsætte. Antallet af pludselige opbremsninger kan derfor reduceres med et mindre antal bagendekollisioner til følge.

Med R-funktionen tillades en trafikstyret forlængelse af rødtiden på op til 2 sek umiddelbart efter gult lys, men inden signalet skifter til rødt/gult for tværretningen. Herved reduceres risikoen for kollisioner med tværtrafikken i de tilfælde, hvor bilerne ankommer til stoplinien i gultiden, og hvor der derfor er risiko for at de kører over for rødt lys.

Et fuldt udstyret LHOVRA anlæg kræver fem detektorer i hver af hovedretnings tilfarter, hvoraf den yderste er en dobbeltdetektor til registrering af lastbiler.

På figur 5.17 er vist et eksempel på detektorplaceringer i et kryds i bymiljø med funktionerne H, O og R. I A-retningen er der passagedetektorer i 80 og 110 m fra stoplinien. Ved stoplinien er der lange tilstedeværelsesdetektorer, der forlænger det grønne lys, så længe der er køretøjer på detektoren. Herved fås en meget præcis afslutning af grøntperioden, idet den sidste bil netop skal til at passere stoplinien, når signalet skifter fra grønt til gult. Detektoren benyttes også til forlængelse af mellemtiden (rødt) ved R-funktionen.



**Figur 5.17** Eksempel på detektorplacering i et kryds med moderne trafikstyring i bymiljø.

Krydset er 2-faset med hvilestillingen "Alt rødt". I krydsets hjørner er der derfor placeret tilstedeværelsesdetektorer, der anmelder cyklister, der venter på at svinge til venstre. Cyklister, som holder på disse detektorer, vil få grønt lys, når der ikke er mere trafik på den vej, hvorfra cyklisterne kom. Samtidig kan detektorerne registrere cyklister, som standser på den forkerte side af stoplinien.

I midten af krydset ligger yderligere en tilstedeværelsesdetektor, der anmelder faser for den tværgående retning efter 10 sek ophold på detektoren efter udløbet af minimumgrøntiden. Herved sikres, at venstresvingende kan fremtvinge et faseskift i de situationer, hvor der bliver ved med at komme modkørende trafik. Denne detektor benyttes også til forlængelse af mellemtiden, hvis der holder flere biler i krydset, som er ved at foretage venstresving under et faseskift.

## 5.8 Samordnede signalanlæg

Hvis der på en strækning findes en serie af signalanlæg efter hinanden, vil køretøjer, der starter fra et kryds, bevæge sig samlet frem mod det næste kryds. Det vil derfor være hensigtsmæssigt at tænde grønt i det efterfølgende anlæg på et sådant tidspunkt, at køretøjsbølgen fra det foregående kryds kan passere uden at skulle stoppe.

Dette forudsætter, at omløbstiden er den samme for alle anlæggene, så de virker i takt med hinanden. Dette sikres gennem synkroniseringskabler mellem krydsene eller meget præcise ure i styreapparaterne. Sådanne signalanlæg benævnes samordnede anlæg.

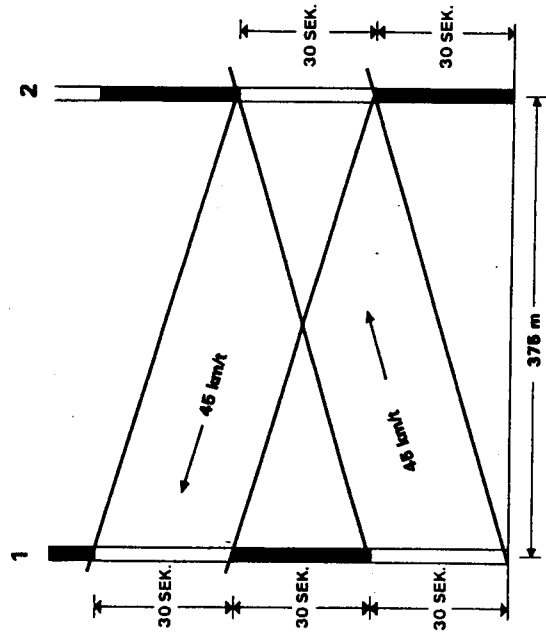
Da omløbstiden er den samme for alle anlæg, er det normalt det anlæg, der kræver den største omløbstid, som bestemmer valget af omløbstid for systemet, med mindre andre krav, som fx hensynet til en god dobbeltrettet grøn bølge, medfører valg af en anden omløbstid.

Hvis en samordning medfører, at trafikanter kan køre igennem en serie af signalanlæg med konstant hastighed, taler vi om en "grøn bølge".

Når en bølge af køretøjer bevæger sig mellem to kryds, vil der ske en vis spredning af køretøjerne. Jo større krydsafstand og middelhastighed, jo større spredning. Erfaringsmæssigt bør samordnede anlæg derfor ikke ligge længere fra hinanden end 800-900 m, hvis trafikanterne skal kunne opfatte samordningen som en grøn bølge. På forretningsgader med parkering, cyklistere, krydsende fodgængere og urolige trafikforhold ophører fordelene ved samordning dog ved noget kortere krydsafstande. Kryds der ligger meget tæt på hinanden bør altid samordnes for at undgå uheldige køopstuvninger mellem krydsene og for at undgå, at trafikanterne skal tage fejl af signalerne i de to kryds.

Det er helt uproblematisk at etablere en grøn bølge for trafikken i den ene retning i en kæde af samordnede signalanlæg. En sådan samordning kan fx betjene myldretidstrafik med en udpræget retningsfordeling. Forskydningen mellem to anlæg skal blot svare til køretiden mellem de to kryds, evt. korigeret for tidsforbruget til afvikling af en kø af indsvingende fra det foregående kryds.

Det kan være mere kompliceret at etablere en grøn bølge for begge retninger på en strækning. Hvis vi betragter figur 5.18 ses, at hvis der skal være grøn bølge i begge retninger, skal køretiden fra kryds 1 til kryds 2 plus køretiden fra kryds 2 til kryds 1 netop svare til ét signalomløb. Eller mere generelt skal køretiden,  $t$ , mellem krydsene være et multiplum af den halve omløbstid, idet der må regnes med samme hastighed i begge retninger:



Figur 5.18 En god grøn bølge i begge retninger kræver, at køretøjer fra kryds 2 til kryds 1 ankommer netop ét signalomløb efter køretøjerne startede fra kryds 1 mod kryds 2.

$$t = n \cdot \frac{C}{2} \quad (5.10)$$

$t$ : køretiden mellem krydsene

$C$ : samordningens omløbstid

$n$ : et helt positivt tal (normalt 1 eller 2)

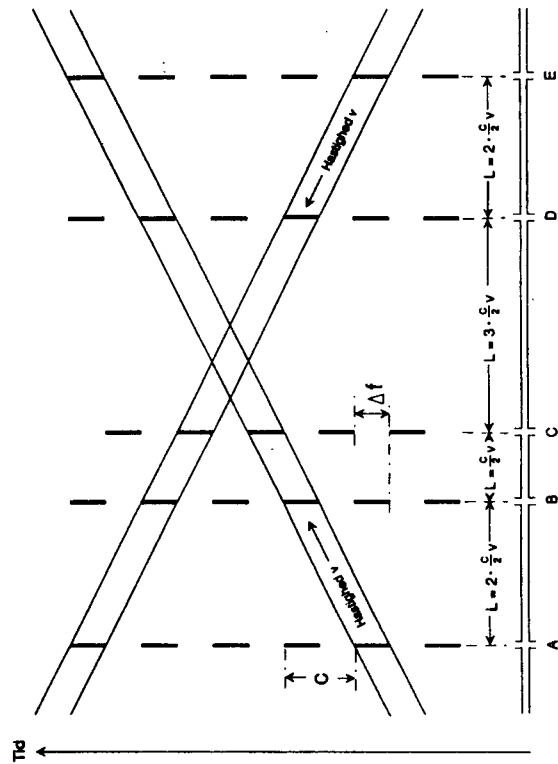
Tidsforskellen mellem start af grønt lys mellem to naboanlæg benævnes *forskydning* jf. figur 5.19. Hvis forskydningen mellem to signalanlæg er en halv omløbstid (grønt mod rødt) eller en hel omløbstid (grønt mod grønt), kan der i princippet altid tilvejebringes en dobbeltrettet samordning på en strækning. For at samordningen for trafikanterne skal kunne opfattes som en grøn bølge, er det dog en forudsætning, at trafikanterne ved en naturlig kørehastighed,  $v$ , møder grønt, når de ankommer til det efterfølgende signalanlæg. Da  $t = L/v$ , fås ved indsættelse i (5.10):

$$t = \frac{L}{v} = n \cdot \frac{C}{2} \quad (5.11)$$

eller

$$L = n \cdot \frac{Cv}{2} \quad (5.12)$$





Figur 5.19 I en dobbeltrettet grøn bølge er signalet i to naboanlæg i princippet det samme eller modsat (grøn/grønt eller rød/rødt).

Med optimale krydsafstande kan der med de givne forudsætninger (omløbstid og køretøjernes hastighed) skabes en god dobbeltrettet samordning. Jo mere krydsafstandene afviger fra de optimale afstande, jo dårligere virker samordningen set fra trafikanternes synspunkt.

For  $n=1$  indsat i (5.12) fås en samordning med en forskydning på en halv omløbstid, dvs. der er grøn i det ene signalanlæg, mens der er rødt i det næste (grøn mod rødt). For  $n=2$  fås samtidigt skift til grøn lys i de to anlæg, dvs. samme signalvisning i hovedretningen i de to kryds (grøn mod grøn). Samtidigt (synkront) skift anvendes ved meget store eller ved meget små krydsafstande.

## Samordning med trafikstyring

Samordninger er ofte tidsstyrte og med mulighed for gennem døgnet og ugen (jf. figur 5.6) at skifte mellem forskellige signalprogrammer, der hver især prioriterer et karakteristisk trafikmønster.

I en del samordninger anvendes dog trafikstyring i større eller mindre udstrækning til at modificere grøntiderne. Typisk er der kun placeret detektorer i side-retningen.<sup>6</sup>

Ved trafikstyret samordning med detektorer i sideretningen kan styreapparater programmeres, så sideretningen enten får grøn i hvert eneste omløb eller kun hvis der ankommer køretøjer. Sideretningen tillades at forlænge grøntiden, hvis der ved afslutningen af den faste del af grøntiden skulle vise sig at være flere køretøjer, der er på vej mod krydset. Hvis sideretningen ikke udnytter muligheden for forlængelse, overføres den ubrugte tid til hovedretningen, som herefter opnår en tidligere grønstart.

Rammerne for trafikstyring inden for en samordning er dog ikke så fleksible som for frit trafikstyrede anlæg, der fungerer uafhængigt af andre signalanlæg, fordi der skal tages hensyn til, at hovedretningen af hensyn til den grønne bølge skal garanteres grøn lys i en bestemt del af omløbet.

## Trafikafhængigt valg af signalprogram

Undertiden udpeges nogle af detektorerne i et signalsystem til at afgøre, hvilket trafikmønster, der aktuelt er rådende i vejnettet. Resultatet benyttes til at vælge netop det signalprogram, der bedst afvikler trafikken. Detektorer, der medvirker til udpegnings af det bedste signalprogram, benævnes strategiske detektorer.

På en strækning kan der fx være to strategiske detektorer til at måle trafikintensiteten i de to retninger og én eller flere til at måle sideretningens trafik i enkelte af krydsene. Ved at måle om trafikintensiteten på de strategiske detektorer ligger over eller under visse forudbestemte niveauer og kombinere disse oplysninger, afgøres hvilket trafikmønster, der er gældende, og det hertil passende signalprogram indkodes.

I Danmark findes der således 10-15 samordninger, hvor det er trafikken, der bestemmer samordningsplanen. Et eksempel på trafikafhængigt valg af signalprogram ses på et samordnet system af syv anlæg på ringvejen syd om Odense. Systemet har her mulighed for at vælge mellem et 92 sek morgenprogram, et 92 sek eftermiddagsprogram og et 54 sek program. De to signalprogrammer for myldretiden favoriserer trafikken i den mest trafikerede retning, mens 54 sek programmet giver en god grøn bølge i begge retninger.

Trafikafhængigt programvalg er især relevant, hvor trafikmønsteret kan være vanskeligt at forudsige, og hvor det kan skifte meget hurtigt, fx i forbindelse med færgetræk, messer, udstillinger, ferier o.l.

## Optimering af samordning med edb

Optimering af samordnede signalanlæg kan være en kompliceret sag at gennemføre, fordi der skal tages hensyn til trafikken i de to retninger, men også til den indsvingende trafik fra sidevejene. Med et engelsk edb-program, TRANSYT

(Traffic Network Study Tool), kan man få beregnet et optimalt signalprogram for et system af samordnede signalanlæg, hvad enten disse ligger på en strækning eller i et net. Programmet kræver følgende inddata:<sup>7</sup>

- Krydsafstande og krydsudformning
- Ønskehastighed mellem krydsene
- Omløbstid
- Faser, minimumgrøntider og mellemtider
- Trafiktintensitet for hver strøm i nettet
- Sporfordeling og grøntimekapacitet i hver tilfart
- Optimeringskriterium

I inddata præsætter trafikanternes enhedsomkostninger ved stop og forsinkelse. Det er herved muligt at optimere efter en vilkårlig vægtning af stop og forsinkelse i vejnettet. I princippet ligestilles enhver trafikant, dvs. forsinkelsen for en indsvingende trafikant tillægges lige så stor vægt som forsinkelsen for en trafikant i hovedretningen. Det er dog muligt at vægte strækningerne forskelligt, så programmet prøver at forbedre samordningen på vægtede strækninger på bekostning af de uvægtede strækninger.

Under optimeringen søger programmet efter den signalindstilling, der bedst muligt opfylder det valgte optimeringskriterium. Når dette signalprogram er fundet, udskrives programmet start- og sluttidspunkterne for grønperioden for hver tilfart, kapacitetsudnyttelsen i hver tilfart, den samlede forsinkelse og antal stop i nettet samt det hertil medgående energiforbrug målt i liter benzin pr. time.

Erfaringerne fra de steder i Danmark, hvor TRANSYT har været benyttet til samordning viser, at antallet af stop og forsinkelse kan reduceres med 10-20 procent og benzinforbruget med 5-10 procent, når man sammenligner med et manuelt udformet signalprogram.

## 5.9 Fejl- og driftsovervågning af signalanlæg

I et system af signalanlæg er det af hensyn til trafikikkerheden og trafikafviklingen væsentligt, at signalanlæggene hele tiden fungerer, som det var tilsigtet. Fejl kan fx skyldes påkørsel af signalmaster med efterfølgende slukning af anlægget, pærer kan brænde over, anlæggene kan blive stående i samme program eller i samme signalbillede, detektorer kan konstant give impulser, falde ud af drift, osv. Ved meget store systemer, som fx i København, Århus, Odense og Aalborg har man i mange år haft fejlsovervågning af visse komponenter i anlæggene. Via synkroniseringskablerne eller telefonnettet er det muligt fra et centralt sted at have kontakt til funktionerne i hvert enkelt styreapparat, der er tilsluttet.

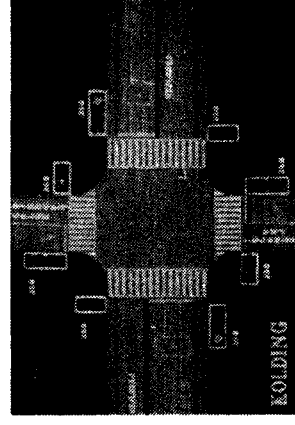
Med den hurtige udvikling i datateknologien er PC'ere nu blevet så billige og kraftige, at de kan benyttes som overvågningscentral for signalanlæg. Med en PC placeret hos den ansvarlige for driften af anlæggene, fx det lokale elværk, går en meddelelse ind på skærmen eller en tilsluttet printer hver gang, der sker væsentlige ændringer, eller der opstår en fejl på et signal eller en detektor. Man kan på skærmen eller på printeren straks se, hvad der er galt, hvor det er galt og kan vurdere, om det er en fejl, der kræver et øjeblikkeligt indgreb, eller om det er en fejl, hvis udbedring kan vente til en passende lejlighed.

På tilsvarende vis kan signalleverandøren fra en PC komme i kontakt med de enkelte dele af systemet via telefonnettet. Leverandøren kan derfor på vejbestyrelsens vegne udføre ændringer i signalparametrene og herigennem sikre, at signalanlæggene fungerer trafikteknisk optimalt.<sup>8</sup>

Detektorbelægninger og signalskift kan præsenteres på skærmen samtidigt med, at de finder sted i krydset. Sammen med løbende udskrifter af, hvad der sker i anlægget, kan skærmen benyttes til at kontrollere, om anlægget virker efter hensigten.

Ved at opsamle og lagre oplysninger om detektorpassagerne kan et overvågningsystem også benyttes til trafiktællingsfunktioner. Med en PC på den tekniske forvaltning kan forvaltningen selv iværksætte trafiktællinger i kryds, der er udstyret med detektorer. Tællinger kan anvendes både til planlægningsformål og til løbende trafikteknisk justering af anlæggene, så det samlede signalsystem afvikler trafikken så effektivt og så sikkert som muligt.

Nogle systemer indeholder også funktioner til automatisk beregning af antallet af stop og forsinkelse for køretøjerne i de enkelte tilfarter. Sådanne funktioner



Med et driftsovervågningssystem kan man få on-line kontakt med de tilsluttede signalanlæg.