

Kapacitet af motorveje

af
Henning Sørensen, Vejdirektoratet

1. Indledning

Formål

Trafikmængden på de danske motorveje er steget væsentligt i løbet af de senere år, og det må forventes at udbygningen af vejnettet de kommende år ikke vil blive foretaget i takt med udviklingen i trafikmængden. Det er derfor særlig aktuelt at undersøge trafikafvikling og kapacitet på motorvejene, således at konsekvenserne af trafikudviklingen bedre kan forudsiges.

Formålet med dette notat er at belyse speed-flow sammenhænge og trafikafviklingsforhold ved kapacitetsgrænsen for stærkt belastede motorveje, og der skal gennemføres en vurdering af vejenes kapacitet. Undersøgelsen udføres for et par stærkt belastede motorveje i det storkøbenhavnske område.

Undersøgelsen er et led i KAFKA-arbejdet, hvor KAFKA står for kapacitets- og trafikafviklingsforhold i Danmark. Resultatet af undersøgelsen kan indgå i arbejdet med revision af de danske vejreglers angivelse af motorvejes kapacitet.

Definition

En motorvejs kapacitet defineres her som det største antal køretøjer der over en 15 minutters periode med rimelighed kan påregnes at kunne passere et snit på motorvejen ved de aktuelle vej- og trafikmæssige forhold. Kapaciteten angives pr. time pr. spor.

Forudsætninger

I denne undersøgelse betragtes 4-sporet motorvej, og undersøgelsens grundlag hidrører fra én delstrækning på Helsingørmotorvejen, M14, og tre delstrækninger på ringmotorvejen, M3.

Målingerne er alle taget i forbindelse med morgen- eller eftermiddagsspidsbelastninger, hvor der hovedsagelig er tale om bolig-/arbejdsstedtrafik med strækningskendte bilister. Trafikken består naturligvis ikke kun af personbiler, og for at opnå et ensartet mål for trafikintensiteten er aktuelle køretøjstyper omregnet til personbilsenheder, pe , ved multiplikation med personbilsækvivalenterne 2,0 og 2,6 for hhv. lastbiler kortere end 12 m (typisk enkelt-lastbiler), busser samt personbiler med trailer, og lastbiler længere end 12 m (typisk leddelte lastbiler), iflg. VD notat [5].

Målingerne stammer fra det tidlige forår 1996 for M14 og fra efteråret 1996 for M3. Dage

med særlige vejrforhold som kunne påvirke bilisterne til at køre på en anden måde end normalt, er udeladt. Forskellige årstider incl. lys-/mørkeforhold samt variation over uge eller døgn indgår ikke som faktorer i undersøgelsen.

Eksisterende retningslinier

Speed-flow sammenhænge og kapacitetsforhold for motorveje er bla. behandlet i de eksisterende danske vejregler fra 1981, VR [1], i den amerikanske Highway Capacity Manual fra 1994, HCM [2], og i den tyske manual "Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Strassen" fra 1993, VLQV [3].

De nævnte kilders angivelse af kapaciteten for 4-sporet motorvej under nærmere fastsatte ideelle forhold for vej og trafikafvikling er følgende:

VR:	2000 pe/time/spor
HCM:	2200 pe/time/spor
VLQV:	3700 køretøjer/time/retning ved 5% lastbiler

hvor pe står for personbilsenheder.

2. Målinger

Målingerne er foretaget følgende steder:

- Helsingørmotorvejen, M14, ved Nærum for trafik mod syd, km 30.330. Målestedet ligger ca. 350 m syd for Skodsborgvej og ca. 200 m nedstrøms sammenfletningspunktet for tilkørslen fra Skodsborgvej. Sammenfletningsstrækningen er dog ganske lang og kileformet, hvorved sammenfletningspunktet ikke er særlig veldefineret.
- Ringmotorvejen, M3, ved Buddinge Hovedgade for trafik mod syd, km 39.320. Målestedet ligger ca. 1,2 km nedstrøms tilkørslen ved Buddingevej og ca. 1,1 km opstrøms frakørslen til Hillerødmotorvejen.
- Ringmotorvejen, M3, ved Islevbrovej for trafik mod syd, km 44.820. Målestedet ligger ca. 1,1 km nedstrøms tilkørslen ved Herlev Hovedgade og ca. 1,4 km opstrøms frakørslen ved Jyllingevej.
- Ringmotorvejen, M3, ved Islevbrovej for trafik mod nord, km 44.820. Målestedet ligger ca. 1,4 km nedstrøms tilkørslen ved Jyllingevej og ca. 1,4 km opstrøms frakørslen ved Herlev Hovedgade.

Betingelserne for valg af målesteder har været:

1. Der er erfaring for at delstrækningen jævnlige belastes til kapacitetsgrænsen.
2. Den pågældende delstrækning er iflg. tællinger det hårdest belastede strækningsafsnit, således at det ikke er sandsynligt at trafiksituationen er skabt af en nedstrøms flaske-

hals, eller at trafikmængden er begrænset ved en opstrøms flaskehals.

Alle målinger er foretaget i snit på motorvejen v.h.j.a. dobbelte induktionsspoler. Målingerne på M3 er foretaget som enkeltkøretøjsmålinger, hvorved der bla. er registreret det enkelte køretøjs tidspunkt for passage af målesnittet, køretøjets placering på spor, hastighed og køretøjslængde. På M14 ved Nærum er trafikken registreret som antal køretøjspassager og gennemsnitshastighed for 1-minut intervaller for begge sydgående spor tilsammen. Der er ikke for målingerne ved Nærum målt køretøjsstørrelse, og derfor har procentdelen af store køretøjer måttet skønnes baseret på en målestation længere nordpå ved Øverødvej.

3. Speed-flow sammenhænge

Baseret på målingerne på de undersøgte strækninger er der beregnet gennemsnitshastigheder og antal personbilenheder, der passerer målestederne.

På fig. 3.1 er afbildet sammenhørende værdier for trafikintensitet og snitmiddelshastighed for målesnittet på M14 ved Nærum. Målestedet er som nævnt udvalgt i forventning om at det ligger i strækningens flaskehals. Til illustrering af trafikafviklingen hhv. i flaskehalsen og umiddelbart opstrøms dennes munding, er ligeledes indtegnede målinger fra en målestation opstrøms sammenfletningen ved Nærum. Målingerne er foretaget samtidig.

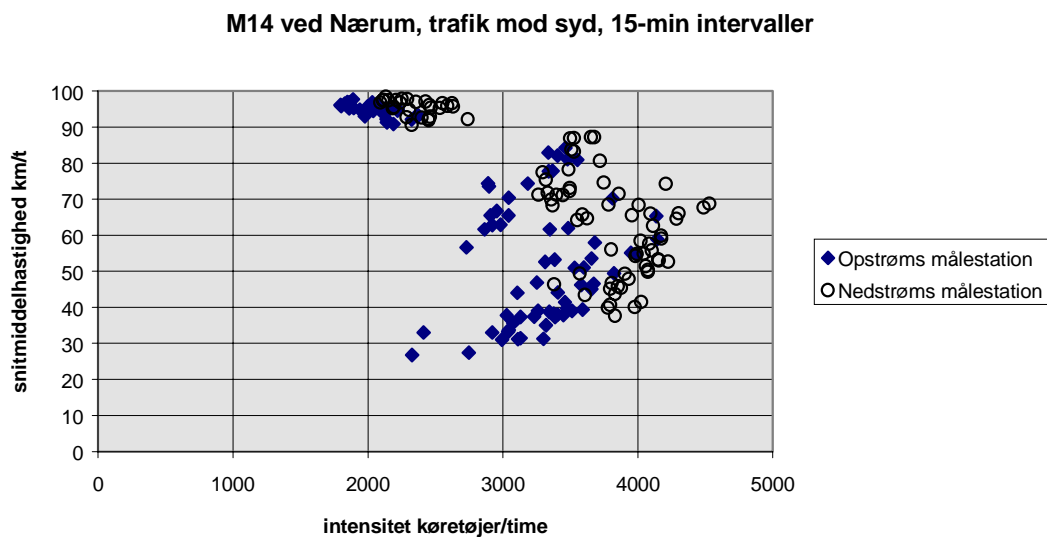


Fig. 3.1 Sammenhørende værdier af snitmiddelshastighed og trafikmængde for to målesnit, hhv. opstrøms og nedstrøms tilkørselsrampe

Som det ses af fig. 3.1 er punkterne for den nedstrøms målestation typisk beliggende lidt over og til højre for punkterne for den opstrøms målestation, hvilket skyldes den øgede hastighed efter passage af flaskehalsens munding samtidig med den øgede trafikmængde efter tilkørselsrampen. Specielt for målestationen opstrøms flaskehalsen ses en del punkter repræsenterende

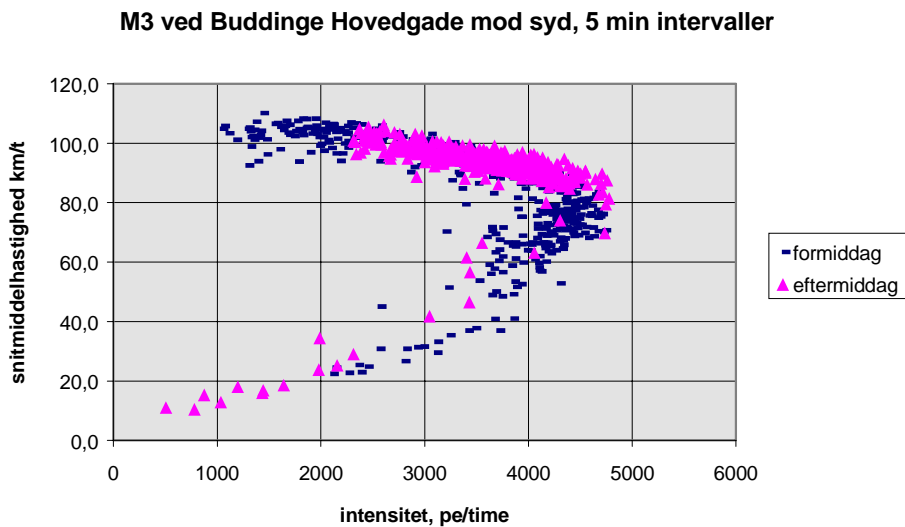


Fig. 3.2. Speed-flow diagram i 5-min intervaller for 23 hverdages spidsbelastningsperioder hhv. morgener og eftermiddage

kø-kørselssituationer. Det er således ikke i flaskehalsen men opstrøms denne at trafikafviklingsproblemerne er størst. Så længe der konstateres kø opstrøms flaskehalsen, er det dermed godt gjort, at der er et potentielt og udækket trafiktilbud for strækningen i selve flaskehalsen.

På fig. 3.2 er afbildet punkter i 5-min intervaller for et af målesnittene på motorringvejen for 23 hverdage. Der konstateres en middelshastighed ved lav trafikintensitet på ca. 105 km/t (“free flow speed”) og derefter en faldende middelshastighed ved intensitet over ca. 2500 pe/time/retning. Man ser en stor spredning i gennemsnitshastighed ved intensiteter på ca. 4000 pe/time/retning og mere.

Fig. 3.3 viser trafikmængden afbildet som funktion af densiteten idet måledata er aggreret i korte tidsintervaller. Densiteten eller tætheden, D , er defineret som:

$$D = N/(nV_s)$$

hvor N er trafikintensiteten opgjort i personbilenheder pr. time pr. retning, n antal spor i pågældende retning og V_s strækningsmiddelshastigheden (her beregnet ud fra måling i snit). Som det ses, er der ved stabil trafikafvikling ved lave densiteter nær sammenhæng mellem densitet og trafikmængde, mens billedet bliver mere udvisket i det område, hvor trafikafviklingen begynder at blive ustabil ved densitet ca. 25 pe/km/spor. Den største trafikintensitet synes at forekomme ved densitet på ca. 30 pe/km/spor. De spredte punkter til højre i diagrammet (densitet over ca. 35 pe/km/spor) repræsenterer hæmmet trafikafvikling og kø-kørselssituationer. Som eksemplet viser, kan densiteten være meget forskellig ved given trafikmængde, svarende til forskellig middelshastighed.

M3 ved Buddinge Hg, trafik mod syd, 4. sep 96 kl. 05:00-09:30,
1-min intervaller

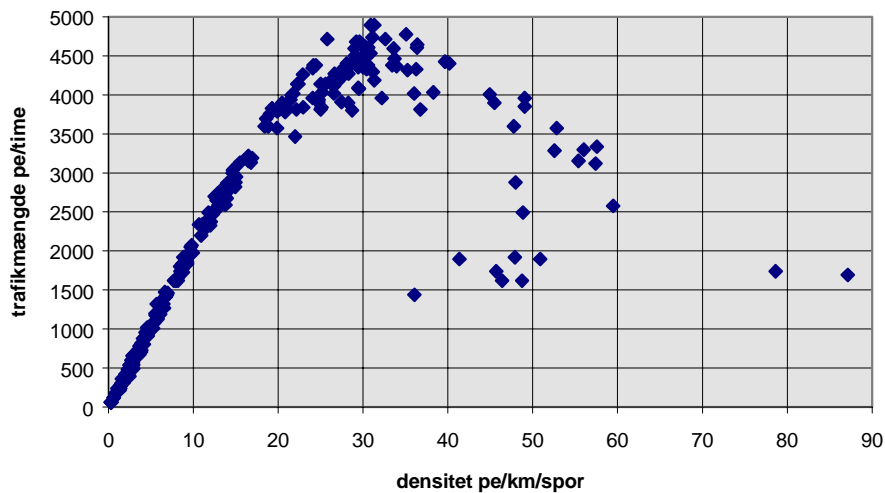


Fig. 3.3. Eksempel på sammenhørende værdier af densitet og trafikmængde for hverdagsmorgen, beregnet i 1-min intervaller

I fig. 3.4 er afbildet sammenhørende værdier af strækningsmiddelshastighed og densitet. Det fremgår at middelshastigheden ved lav belastning ligeledes her er ca. 105 km/t, og at denne er nogenlunde konstant indtil en densitet på ca. 12 pe/km/spor. Herefter aftager hastigheden jævnt, og ved densitet over ca. 25 pe/km/spor sker der en større spredning af punkterne. Ved en densitet på 35 pe/time/spor er middelshastigheden nede på 50 - 60 km/t. Der er ikke opnået punkter repræsenterende det fuldstændige trafiksammenbrud med stillestående biler, men forlængelse af kurver (som fx. fig. 3.3 og 3.4) synes at indikere at dette sker ved densitet mellem 70 og 100 pe/km/spor (“jam density”).

M3 ved Islevbrovej, trafik mod syd, 5-min intervaller

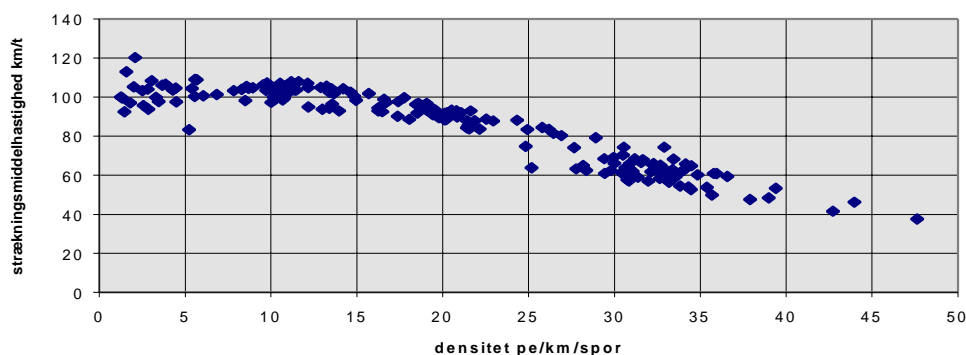


Fig. 3.4. Strækningsmiddelshastighed som funktion af densitet for 6 hverdagsmorgener

4. Estimering af kapacitet

Forudsætninger

Kapaciteten for en motorvejsstrækning blev defineret i afsnit 1. Kapaciteten skal her opfattes som en stokastisk variabel der påvirkes af tilfældige variationer, herunder af forskelle i trafikanternes måde at køre på, variation af køretøjer, forhold på og ved vejen oa.

Der er adskillige spørgsmål der skal afklares i forbindelse med måling af kapacitet på strækning, hvoraf de mest iøjnefaldende er:

1. Om der er en opstrøms flaskehals, der begrænser den trafikmængde, der kan komme til den betragtede strækning.
2. Om der i hele det betragtede tidsrum er tilstrækkeligt tilbud af trafikanter til at "mætte" strækningen til kapacitetsgrænsen.
3. Om der er en nedstrøms flaskehals, som påvirker trafikafviklingen på målestedet.
4. Om der er indtruffet særlige begivenheder som påvirker trafikafviklingen.

Som beskrevet i afsnit 2 er strækningerne udvalgt netop ud fra forventning om at punkterne 1, 2 og 3 er opfyldt.

Punkt 1 kan være et problem ved bestemmelse af strækningers kapacitet. Dette skyldes at trafikken på én eller anden måde skal ind på strækningen, og at systemet til indføring af trafik skal have mindst den samme kapacitet som strækningskapaciteten for at det er sidstnævnte kapacitet der måles. En måde til vurdering af om strækningskapaciteten nås, er at analysere trafikafviklingen i tiden ved og umiddelbart efter at største trafikintensitet er opnået. Såfremt trafikken her udviser tendens til hæmmet afvikling med lav hastighed, kunne det tyde på at selve strækningen er mættet til kapacitetsgrænsen, givet der ikke er tale om en nedstrøms flaskehals

I forbindelse med spørgsmålet om hvorvidt trafiktilbudet er tilstrækkeligt stort for hele tidsrummet, hvor den største trafikmængde registreres, er det for et par af måle-snittene muligt at inkludere målinger opstrøms flaskehalsens munding. Dette er tilfældet for trafik mod syd på M14 ved Nærum og for trafik mod syd på M3 ved Buddinge Hovedgade. Såfremt der på disse opstrøms motorvejsspoler registreres kødannelse foran flaskehalsens munding, antages det at der er trafik til rådighed til mætning af den pågældende strækning.

For at mindske sandsynligheden for at uvedkommende hændelser som fx. trafikuheld har haft effekt, er data analyseret, og fx er datasæt med trafiksammenbrud på usædvanlige tidspunkter og ved særligt lave trafikmængder blevet udeladt. Det kan dog ikke undgås at visse begivenheder på selve strækningen eller tilstødende strækninger, der influerer på trafikafviklingen, ikke kan identificeres ud fra målingerne, og der ligger heri en usikkerhed.

Tidsinterval

Tidsintervallet i hvilket trafikmængden opgøres har betydning for angivelsen af størst registrerede trafikmængder. Dette skyldes at de størst mulige trafikintensiteter som nævnt er af stokastisk natur og dermed varierer. Derfor antages det at man ved opgørelse af trafikintensitet over kortere tidsintervaller kan finde større værdier end ved opgørelse over lange sammenhængende tidsintervaller hvor toppe i trafikintensiteten udglattes. Det må derfor forventes at kapaciteten fastsættes til en lavere værdi ved valg af et langt tidsinterval og omvendt.

Derfor er det nødvendigt at foreskrive et tidsinterval som en kapacitetsangivelse er udtryk for. Et tidsinterval på 15 min synes at være et rimeligt valg, idet der herved – dels er tale om en så lang periode at kapacitet ikke betragtes som en kortvarig, tilfældigt forekommende begivenhed, – dels ikke er tale om så langt et tidsinterval at det i praksis vil være vanskeligt at opnå en vedholdende trafik under ensartede forhold, – og dels anvendes samme intervalstørrelse som i HCM. Derfor er i denne undersøgelse anvendt 15-min intervaller.

Estimering baseret på størst registrerede trafikintensiteter

Til opgørelse af en strækningens kapacitet anvendes her en ren empirisk metode der er baseret på registrering i snit af de enkelte spidsbelastningsperioders største trafikintensiteter.

For de medtagne målinger er der for hver spidsbelastningsperiode fundet den størst forekommende trafikintensitet i faste 15-min intervaller hvilket er omregnet til time-niveau. På basis af disse observationer er der dels beregnet middelværdier og dels fraktiler, hvor 0%-fraktilen repræsenterer den laveste observation og 100%-fraktilen den højeste. Resultatet af disse beregninger er indsat i tabel 4.1. Fig. 4.1 viser grafisk hvordan samtlige observationer for alle målestederne fordeler sig.

Delstrækning (fm: morgentrafik, em: eftermiddags trafik)	Gen- nem- snit	Fraktil					An- tal obs.
		0 %	15 %	50 %	85 %	100 %	
M3 Islev, syd, fm	4471	4173	4290	4475	4620	4747	24
M3 Islev, syd, em	4432	4210	4310	4415	4590	4719	21
M3 Islev, nord, fm	4532	4318	4380	4530	4675	4787	27
M3 Budh, syd, fm	4405	4146	4260	4429	4520	4650	15
M14 Næru, syd, fm	4404	4177	4250	4370	4560	4709	16
Alle delstrækninger	4459	4146	4310	4451	4625	4787	103

Tabel 4.1. Største registrerede trafikmængder pe/time/retning, målt i 15-min intervaller

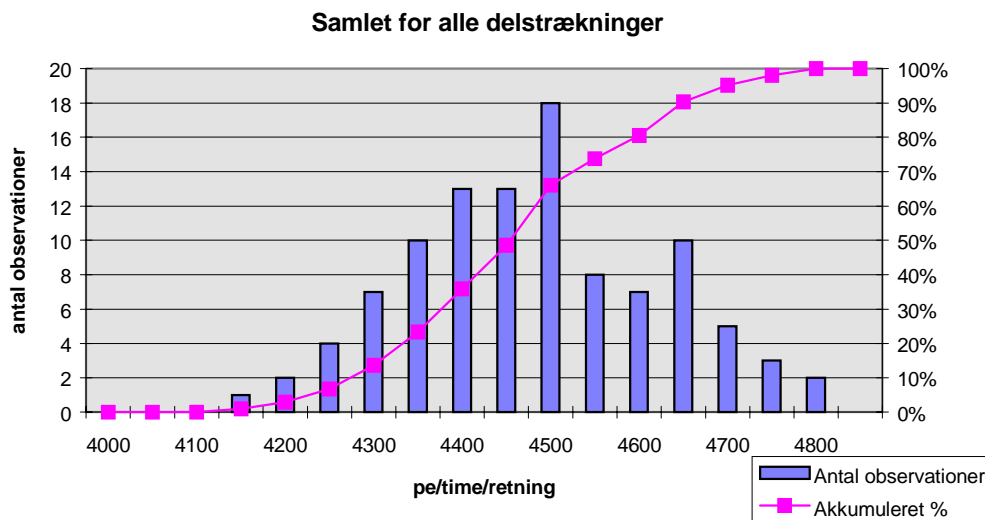


Fig. 4.1. Hyppighed af størst registrerede trafikmængder

Estimering baseret på speed-flow diagram

En anden metode til estimering af kapacitet er brug af speed-flow diagrammer.

Trafikkens gennemsnitshastighed er observeret ved forskellige trafikintensiteter, hvorved målingerne kan optegnes i speed-flow diagram. Der indlægges en matematisk model til at beskrive speed/flow sammenhænge ud fra de målte punkter, og den størst mulige trafikmængde (kapaciteten) findes i det punkt hvor kurven for den matematiske model har sit maksimum, se fig. 4.2.

I forhold til metoden med fordelingen af de størst registrerede trafikmængder udnyttes her ikke kun en enkelt måling pr. spidsbelastningsperiode men i princippet alle medtagne værdier. Problemet ved estimering af kapaciteten ud fra en matematisk model er at resultatet afhænger af hvilken matematisk model der vælges, og at der ikke umiddelbart kan argumenteres for at én bestemt model er den korrekte.

Der er her valgt følgende modeltype (se reference [4]):

$$v^{1-m} = v_f^{1-m} [1 - (d/d_j)^{l-1}], \quad 0 \leq m < 1, \quad l > 1$$

hvor v er middelhastighed ved densiteten d , v_f middelhastigheden ved lav belastning (“free flow speed”) og d_j densiteten ved trafiksammenbrud (“jam density”). v_f er relativ let at estimere og er som tidligere nævnt typisk ca. 105 km/t for de aktuelle motorvejsstrækninger. d_j er derimod vanskelig at fastsætte og er ikke målt tilfredsstillende ved denne undersøgelse. Baseret på nærmere analyse sættes d_j her til 90 pe/km/spor. Parametrene l og m estimeres således at de målte punkter bedst “fittes”.

Der er ved undersøgelsen set en tendens til at punkterne i speed-flow diagrammet er mere spredte og ligger lavere når trafikken regenererer efter dårlig trafikafvikling, end når trafikken stiger mod kapacitetsgrænsen og køkørselssituationen opstår. Da den matematiske model skal anvendes til estimering af kapaciteten, udelades punkter repræsenterende regenerering fra køsituation til normal trafikafvikling i fastlæggelse af den matematiske model.

I eksemplet i fig. 4.2 er sammen med målte punkter (repræsenterende opbygning af “kapacitets-” og køkørselssituationen) indtegnet modellen af ovennævnte type med “free flow speed” på 105 km/t, “jam density” på 90 pe/km/spor og de værdier af l og m der er fundet ved regressionsanalyse.

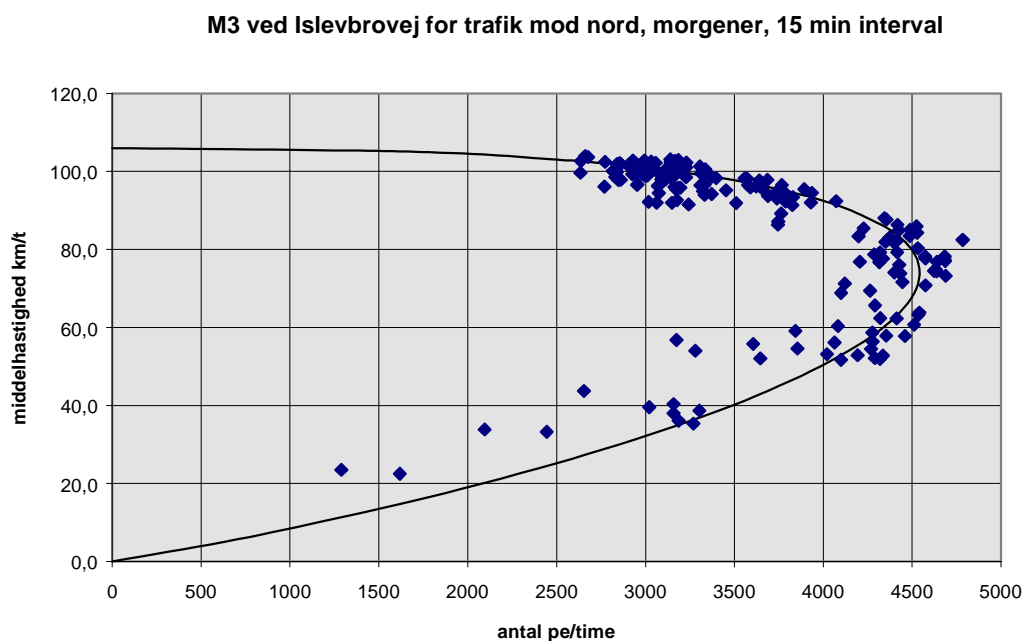


Fig. 4.2. Eksempel på speed/flow diagram med målte punkter og indlagt model

I tabel 4.2 er vist trafikintensitet og hastighed hvor den indlagte model antager den maksimale trafikintensitet. Ved sammenligning med fordelingen af størst registrerede trafikintensiteter iflg. tabel 4.1 ses, at kapaciteten fastlagt ud fra speed-flow diagrammer her giver højere værdier end 15%-fraktilen og lidt lavere værdier end 50%-fraktilen i fordelingen af størst registrerede trafikintensiteter.

Det konstateres endvidere at middelshastigheden for hvilken den indlagte model giver størst intensitet varierer mellem 64 og 79 km/t. Som tidligere nævnt skyldes de lave hastigheder for M14 ved Nærum at målesnittet er beliggende tæt ved flaskehalsens munding.

Delstrækning (fm: morgentrafik, em: eftermiddags trafik)		
	Max intensitet pe/t/retn	Hast. v. max intensitet
M3 Islev, syd, fm	4460	76 km/t
M3 Islev, syd, em	4410	79 km/t
M3 Islev, nord, fm	4510	74 km/t
M3 Budhg, syd, fm	4310	77 km/t
M14 Næru, syd, fm	4260	64 km/t
Gennemsnit	4390	74 km/t

Tabel 4.2. Aflæst maksimum for model over speed/flow sammenhænge

5. Konklusion

For de undersøgte strækninger og perioder kan sammendrages,

- at middelhastigheden ved lav trafikintensitet og densitet (“free flow speed”) typisk er ca. 105 km/t,
- at middelhastigheden er næsten uafhængig af trafikintensiteten for trafikintensiteter under ca. 2500 pe/time/retning og densitet under ca. 12 pe/km/spor,
- at ved trafikintensitet over ca. 2500 pe/time/retning og densitet over ca. 12 pe/km/spor falder middelhastigheden markant med stigende intensitet,
- at ved trafikintensitet over ca. 4000 pe/time/retning fortsætter faldet i middelhastigheden, og denne udviser tillige stor variation indikerende at trafiksituationen bliver ustabil, og
- at både trafikintensitet og hastighed falder ved densitet over ca. 35 pe/km/spor, og der er tale om hæmmet trafikafvikling og køkørsel.

Hastigheden ved kapacitetsgrænsen er typisk mellem 60 og 80 km/t, idet den afhænger af bla. målestedets beliggenhed, hvor specielt afstanden mellem målestedet og flaskehalsens munding påregnes at spille en rolle. Men selv for samme målested kan middelhastigheden svinge 30 km/t eller mere, når trafikintensiteten er tæt på kapacitetsgrænsen.

Såfremt man estimerer kapaciteten ud fra størst registrerede trafikintensiteter er ét af de spørgsmål der skal tages stilling til, om det er middelværdien eller en fraktil, og i givet fald hvilken fraktil i fordelingerne af største trafikmængder, der skal udtrykke strækningens kapacitet. En forsigtig holdning vil være fx. at angive trafikmængden ved 15%-fraktilen, idet dette mål for kapacitet herved kun påregnes ikke at kunne holde i 15% af tilfældene.

Ved en undersøgelse som den her gennemførte vil de konstaterede største trafikmængder aldrig være “for høje”, idet alle usikkerheder omkring opfyldelse af krav til strækning og trafik

nævnt i afsnit 4 vil trække ned for de størst registrerede trafikmængder. Derfor kunne en 50%-fraktil som mål for kapaciteten være relevant.

Såfremt der anvendes en 50%-fraktil, og der benyttes observationer for alle målestrækninger, er kapaciteten af de undersøgte 4-sporede motorvejsstrækninger således bestemt til 4451 pe/time/retning eller 2225 pe/time/spor.

Ved estimering af kapaciteten ved regressionsanalyse ved den i afsnit 4 angivne matematiske model fås kapaciteten til 4390 pe/time/retning, hvilket giver 2195 pe/time/spor.

Som det ses af tabellerne 4.1 og 4.2 er der for de beregnede største trafikintensiteter nogen afvigelse mellem strækningerne. Afvigelserne kan naturligvis i et vist omfang begrundes i kapacitetens stokastiske natur, men må nok også søges i forskelle i vej- og trafikforhold hvor fx. udformning og trafik for nærliggende ramper kunne spille en rolle. Endvidere er der ved undersøgelsen forbundet en usikkerhed hidrørende fra forstyrrelser som det ikke har været muligt at konstatere i forbindelse med målingerne, fx. i form af en momentan kødannelse p.gr.a. nedstrøms trafikafviklingsproblemer. Det må endelig anføres at målingerne på M14 ved Nærum er udført under lidt mere vinterlige forhold end de øvrige målinger.

Referencer:

1. Vejregler, hæfte 4.30.01 Trafikteknik, Vej- og stityper, Vejdirektoratet, Vejregeludvalget, maj 1981
2. Highway Capacity Manual, Transportation Research Board, Washington D.C., 1994
3. Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und Qualität des Verkehrsablaufes auf Strassen, Forschungsbericht FE-nr. 02.141 R90F, 1993
4. A.D. May: Traffic Flow Fundamentals, Chapter 10, Prentice Hall, 1990
5. Korrektion for trafikens sammensætning, motorveje - fri strækning, Vejdirektoratet notat nr. 26, 1996