

Cand. Polyt.
Michael Jørgensen
Danmarks Tekniske Universitet, DTU.
Instituttet for planlægning, IFP.

Med de forventninger der er til den fremtidige udvikling af operationstallet i Kastrup Lufthavn bliver det nødvendigt indenfor den næste 10 års periode at skabe mulighed for en yderligere kapacitetsforøgelse.

En mulighed for en kapacitetsfremmende foranstaltning ligger i separationsnedsættelse mellem de landende fly. På nuværende tidspunkt skal der indlægges en separation på 3 NM (nautiske mile) mellem landende fly i samme vægtkategori. Denne kan nedsættes til 2,5 NM ifølge Amerikanske undersøgelser foretaget af FAA (Federal Aviation Administration)

Gennem mit eksamensarbejde på Danmarks Tekniske Universitet, DTU, fandt jeg frem til et afslag på den separationsnedsættelse i Kastrup Lufthavn. Ud fra dette afslag undersøgte jeg i rapporten hvordan situationen på nuværende tidspunkt er mht. baneopholdstider sammenholdt med de eksisterende og fremtidige afkørselsmuligheder på banerne 04R-22L og 04L-22R.

De efterfølgende afsnit er et sammendrag af relevante afsnit fra eksamensprojektet.

Opholdstiden på banen, ROT.

Det bliver stadig diskuteret om afstanden mellem landende fly i samme vægtklasse, eller hvor en mindre vægtklasse er efterfulgt af en større vægtklasse kan sættes ned. Nedsættelsen fra 3 NM til 2,5 NM skulle gøres gældende de sidste 10 NM inden flyet passerer tærsklen, med henblik på en forøgelse af kapaciteten.

Der er lavet undersøgelser, hvor man har set på mulighederne for en reduktion af separationsafstanden mellem landende fly. FAA undersøgte igennem 80'erne en række amerikanske lufthavne, bl.a. Dallas og Atlanta, hvor man gennem demonstrationer fandt frem til, at en tilladelse til nedsættelse af afstanden fra 3 NM til 2,5 NM kunne gives.

Der er dog en række forudsætninger, der skal være overholdt, inden en tilladelse kan gives, bla:

- Den maksimale gennemsnitlige baneholdstid må være 50 sekunder.
- Ingen problemer med turbulens
- Der skal laves en forudgående demonstration, der skal eftervise muligheden af nedsættelsen.

I 1988 fik Kastrup Lufthavn afslag på en nedsættelse af separationen, da W.G. Jørgensen (SLV) ikke fandt, at en overførsel af reglen med 50 sek. maksimal opholdstid på banen kunne efterleves i Kastrup.

Kapacitetsforøgelseeffekten er i teorien 1,2 ved separationsnedsættelsen, forudsat at der er tale om en følge af ens fly med samme indflyvningshastighed. Dvs. 20% ekstra fly, der lander indenfor samme interval. FAA estimerede sig til en forøget kapacitet på 15%, mens CAA UK kun regnede med en gevinst på ca. 3%.

I virkeligheden kan følgende antagelse gøre sig gældende:

Med en separation på 3 NM vil afstanden blive reduceret til det bagfra kommende fly ved nedsættelse af hastigheden under indflyvningen, så den reelle afstand mellem de landende fly kommer ned på 2,5 NM. Dermed er den ønskede kapacitetsgevinst ikke at finde som den i teorien beregnede.

Opholdstiden betegner det tidsrum fra et fly passerer tærsklen til flyet har forladt banen, eller fra et startende fly ruller ind på banen til det er fri af banen.

Opholdstidens betydning for kapaciteten, og trafikafviklingen, kan anskueliggøres på følgende måde, at jo hurtigere et fly er fri af banen, des hurtigere er banen klar til at modtage næste fly.

Der kommer også betragtninger omkring flyvelederen/pilotens betjening/benyttelse af banen ind i overvejelserne omkring opholdstiden, da en bane, der hurtigt bliver klar for næste fly, også giver en lettere betjening for flyvelederen af næste fly.

To parametre der primært bestemmer opholdstiden på banen er indflyvningshastigheden, hastigheden hvormed flyet passerer tærsklen, og afkørselshastigheden, dvs. den hastighed flyet forlader banen med. Gennem lufthavnens geometriske udformning, er det muligt at mindske denne difference ved at forøge afkørselshastigheden vha. ændret afkørselsforhold.

Resultater af de praktiske ROT-målingerne.

Udregninger og kommentarer er, hvis andet ikke er anført, knyttet til bane 22L, da de fleste observationer er taget på denne bane.

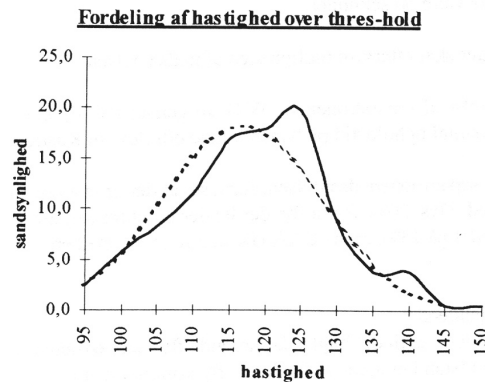
Den gennemsnitlige hastighed og baneopholdstiden er udregnet for hver flytype, og følgende resultater er fremkommet for de tre mest betjente flytyper i Kastrup, tabel 1, der står for ialt 72,7% af alle operationer:

Flytype	Gn. Indflyvningshastighed (knob)	Gn. Baneopholdstid (sekunder)
DC9/MD80	123	52
Fokker 50	106	46
B737	126	55
Gennemsnit	119	51,4

Tabel 1: Gennemsnit for de mest benyttede flytyper i Kastrup.

Betragtes resultatet for de i Kastrup tre mest benyttede flytyper, DC9/MD80, Fokker 50 og Boeing 737, er det kun Fokker 50, der kommer under kravet på max. 50 sekunder i gennemsnitlig baneopholdstid for en separationsnedsættelse af de nuværende 3 NM til 2,5 NM. Ses der derimod på det totale gennemsnit, er det 1,4 sekund, der adskiller de målte fly fra kravet om maksimalt 50 sekunders gennemsnitlig baneopholdstid ved en separationsnedsættelse.

Fordelingen af hastigheden hvormed flyene passerer tærsklen er angivet i figur 1, hvor der også er indtegnet en normalfordeling (stiplet linie) med samme middelværdi og spredning. Gennemsnitshastigheden er fundet til 119 knob med en spredning på 10,8



Normalfordelingen er blevet sammenlignet med den observerede fordeling gennem en chi-i-anden-test udført i Excel-regneark.

Resultatet af denne sammenligning er, at den observerede fordeling med 95% sikkerhed kan antages at udspringe af normalfordelingen.

Figur 1: Hastighedsfordeling

Indflyvningshastigheden kontra baneopholdstiden.

Der er gennem målingerne fremkommet nogle sammenhænge mellem den hastighed flyet har over tærsklen, og den opholdstid flyet har på banen.

Følgende punkter vil blive undersøgt:

- 1) Jo større et flys indflyvningshastighed er, des mindre bliver opholdstiden på banen betragtet for hver afkørsel.
- 2) Jo større indflyvningshastigheden er, des større opholdstid på banen, betragtet samlet for alle afkørsler.

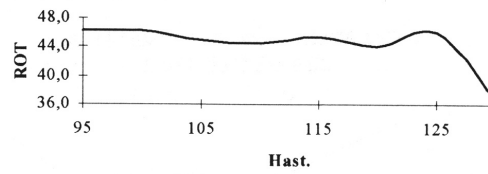
Der er udarbejdet fire forskellige afhængigheder mellem indflyvningshastigheden og baneopholdstiden. Indflyvningshastigheden er under målingerne afrundet til nærmeste 5 knob.

- 1) Den samlede afhængighed mellem hastigheden og opholdstid.
- 2) Hastighedens sammenhæng med opholdstid, når der deles op på hver afkørsel.
- 3) og 4) er parallelle til 1) og 2), her er der bare taget et gennemsnit af opholdstid ved hver 5 knobs

interval.

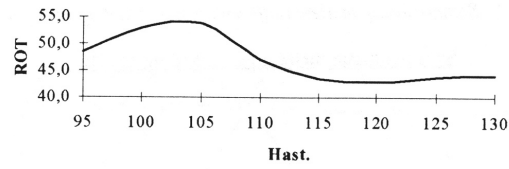
Der er i Excel-regneark lavet en række grafer. Graferne for 1) og 2) er i bilag 21, mens graferne for 3) og 4) er gengivet i figur 2-7.

**Sammenhæng mellem hast. og gn.ROT for
afkørsel 12-30**



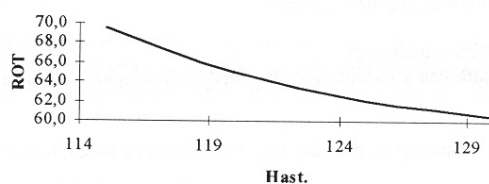
Figur 2: Sammenhæng mellem indflyvningshastighed. og ROT for afkørsel 12-30.

**Sammenhæng mellem hast. og gn.ROT for
afkørsel TWY2E**



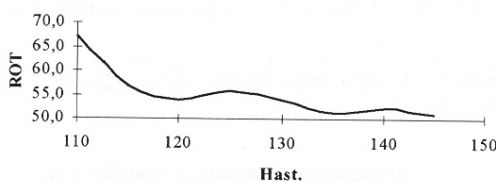
Figur 3: Sammenhæng mellem indflyvningshastighed og ROT for afkørsel TWY2E.

**Sammenhæng mellem hast. og ROT for
afkørsel TWY3**



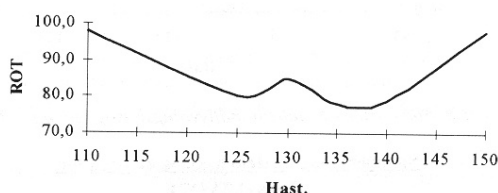
Figur 4: Sammenhæng mellem indflyvningshastighed og ROT for afkørsel TWY3.

**Sammenhæng mellem hast. og gn.ROT for
afkørsel TWY2C**



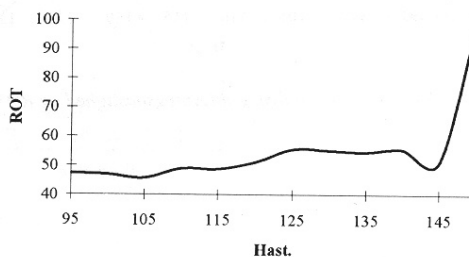
Figur 5: Sammenhæng mellem indflyvningshastighed og ROT for afkørsel TWY2C.

**Sammenhæng mellem hast. og gn.ROT for
afkørsel 04LB-TWY1**



Figur 6: Sammenhæng mellem indflyvningshastighed og ROT for afkørsel 04LB-TWY1.

Sammenhæng mellem hastighed og Gn.ROT



Figur 7: Sammenhæng mellem indflyvningshastighed og gennemsnit ROT.

Det bedste eksempel på en accept af hypotesen om faldende opholdstid på banen ved stigende hastighed betraget for hver afkørsel findes af figur 4. Afkørsel af TWY2C og TWY2E viser i mindre grad også en direkte sammenhæng mellem faldende baneopholdstid og stigende hastighed. Betragtes figur 7, viser det sig, at der forekommer en mindre stigning af opholdstiden med stigende indflyvnings-hastighed.

På en måde er det godt for trafikafviklingen, hvis flyene har en stor indflyvningshastighed, forudsat at den planlagte afkørsel bruges. Er dette ikke tilfældet vil det betyde en forøgelse af den gennemsnitlige baneopholdstid.

Det ville i teorien gavne gennemsnittet af baneopholdstiden, hvis piloternes anmodning om at benytte bestemte afkørsler blev afvist, hvis det er en "tidsforlængende" afkørsel.

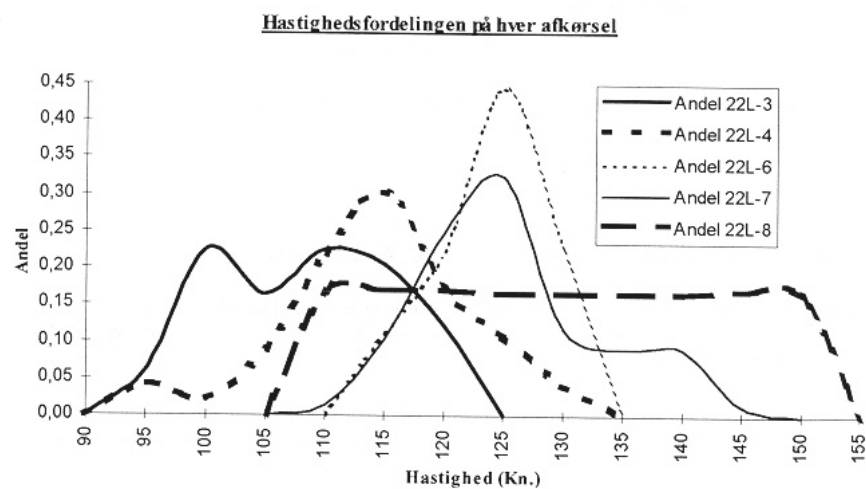
En metode var at fastholde en given hastighed af flyet under indflyvningen. Det vil betyde, at en afkørsel med en vis sikkerhed kan benyttes. Derved undgår man de

indflyvningshastigheder, der ligger på vippen mellem to afkørsler, og får også en mere ensartet strøm af de landende fly.

Fordelingen af indflyvningshastigheden for hver afkørsel er illustreret i figur 8. Her kan det betragtes hvor stort overlappet er mellem de enkelte afkørslers indflyvningshastigheder. Under en antagelse af, at alle fly bremser lige godt, ser det mere eller mindre tilfældigt ud, hvilken afkørsel der benyttes. Spredningen ved, og overlappet af, de enkelte afkørsler, afspejler reelt, de differencer der ligger imellem piloternes flyvning.

Metoder der begrænser overlappet mellem afkørslerne vil kunne medføre, at banebenyttelsen bliver effektiviseret.

Sammenhængen mht. større ROT ved større hastighed generelt betragtet, skyldes forbikørsel af planlagte afkørsler. Forbikøres en ellers planlagt afkørsel, skal flyet forsætte til næste afkørsel med en hastighed, der egentlig var afpasset den forrige. Tidsforbruget mellem de to afkørsler bliver derfor forholdsvis stort, med en stigning af baneopholdstiden til følge.



Figur 8: Hastighedsfordelingen på hver afkørsel.

ICAO skriver i Aerodrome Design Manual, part 2, at det er af stor vigtighed, at man gennem samarbejde får faste retningslinier for hurtigafkørslerne, der gælder i alle dele af verden. Således fås der ens afkørselsforhold, hvorved banekørslen bliver afviklet hurtigt og sikkert. Retningslinierne i Aerodrome Design Manual angiver estimater for afstanden mellem tærskel og afkørslerne. De er

udarbejdet fra en undersøgelse lavet i 1981, og resultatet udmundede i de procentvise mulige afkørsler ved alternative afstande, se tabel 2 og 3.

Flygruppe	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%
A	1170	1320	1440	1600	1950	2200	2900
B	1370	1480	1590	1770	2070	2300	3000
C	1740	1850	1970	2150	2340	2670	3100
D	2040	2190	2290	2480	2750	2950	4000

Tabel 2: Benyttelsen af hurtigafkørsel angivet ved meter fra tærskel (kilde [27]).

Gruppe A	Mindre end 91 knob
Gruppe B	Mellem 91 knob og 120 knob
Gruppe C	Mellem 121 knob og 140 knob
Gruppe D	Mellem 140 knob og 165 knob, også selvom den maksimalt tilladelige hastighed over tærsklen er 152 knob

Tabel 3: Flygruppeinddelingen (kilde [27]).

Forudsætningen i tabel 2 ligger i den antagelse, at kan et givent fly benytte en afkørsel, med en vinkel på over 45 grader i afstanden X fra tærsklen, kunne denne afkørsel lige så godt havde været en hurtigaf-kørsel.

ICAO's kontra observerede afkørselsbenyttelse.

Sammenlignes tabel 2 med undersøgelsen i Kastrup Lufthavn fås følgende resultater for flytyperne DC9/MDSO, B737 og Fokker 50:

flytype DC9/MD80

ICAO	50% ved 1740 meter
Observeret	99,1% ved 1740 meter

Ifølge ICAO skal der en afstand til afkørslen på ca. 3000 meter for af klare en andel på 99,1%.

Flytype B737;

ICAO	50% ved 1740 meter
Observeret	96% ved 1330 meter

Her skal der, ifølge ICAO, en længde til afkørslen på ca. 2700 meter for at tage en andel på 96%.

Flytype Fokker 50;

ICAO	50% ved 1370 meter
Observeret	100% ved 1330 meter

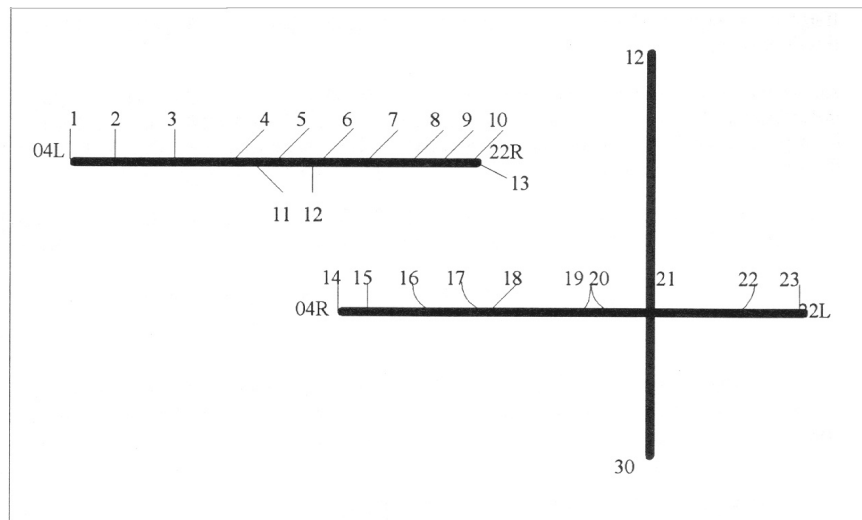
3000 meter afstand til afkørslen er anbefalet af ICAO, for at kunne tage 100% af de landende fly.

Det kan ses ud fra denne sammenligning, at den observerede afstand er halv så stor, ved samme benyttelsesandel, som den afstand der foreslås af ICAO. Dette til trods for at ICAO's afstande også er fremkommet via observationer.

De faktorer, der gør sig gældende kan være mange. Kastrup bliver betjent af en stor del SAS-fly, der har mange operationer i Kastrup, hvormed piloternes lokalkendskab til banerne og deres afkørsler er stort.

AFKØRSLERNE I KASTRUP LUFTHAVN.

Kastrup er i besiddelse af følgende afkørsler på banerne 22L, 22R, 04L og 04R.



1 = 04LA-TWY1	10 = TWY1A	19 = TWY2D
2 = 04LB-TWY1	11 = 04L-TWY2	20 = TWY2E
3 = 04LC-TWY1	12 = 22RF-TWY2	21 = 12-30
4 = TWY1H	13 = TWY2Y	22 = TWY6
5 = TWY1G	14 = 04RA1-TWY2	23 = TWY2
6 = TWY1E	15 = 04RA2-TWY2	
7 = TWY1D	16 = 04RB-TWY2	
8 = TWY1C	17 = TWY2C	
9 = TWY1B	18 = TWY3	

Den største mangel blandt de anvendte afkørsler, er ved dem, der er anlagt på bane 22R-04L.

Ved landinger på bane 22R er der i skrivende stund ingen hurtigafkørsler. Afkørslerne 04LA-TWY1, 04LC-TW Y 1 og 04LC-TWY1 er retvinklede, de resterende afkørsler er anlagt med en vinkel på 120-140 grader målt fra kørselsretningen. De afkørsler, der er retvinklede, eller vinkler mod køreretning, forudsætter, at farten er nede på 20-40 km/t, og manøvreringen bliver dermed besværlig og tidskrævende.

Af målinger fra Kastrup ses det at opholdstiden på bane 22R, ses det, uden at kunne drage nogen konklusion med statistisk belæg, at baneopholdstiderne er større end ved landinger på bane 22L. Undersøgelsen viste, at der var en tidsbesparelse på 7,7 sekund, hvis der blev anlagt hurtigafkørsler i stedet for de modsatrettede afkørsler ved en samlet betragtning mellem afkørsel .

Afkørslerne fra baneenderne 22L, 04R og 04L fungerer tilfredsstillende, ifølge N. C. Brandt Andersen (SLV) samt personalet i kontrollårnet. Et enkelt minus skal dog tillægges afkørslerne fra bane 04L. De landende fly benytter afkørslerne TWYI A-TWY I H. Disse afkørsler ligger langt nede ad banen for et fly som Fokker 50, så piloterne korrigerer ofte for denne ekstra afstand ved at overflyve det meste af landingsbanen, før de sætter hjulene på banen.

Konklusionen er, at afkørslerne er uhensigtsmæssigt anbragt på bane 04L.

PLANLAGTE AFKØRSELSÆNDRINGER I KASTRUP.

Det er planlagt at udbygge med to hurtigafkørsler på bane 22R, en overfor afkørsel TWY1H i første etape, og en overfor afkørsel 04LC-TWY1 i anden etape, se oversigtstegning.

Ifølge udtalelser fra N. C. Brandt Andersen (SLV) vil det lette betjeningen af fly på bane 22R, både for flyvelederne og for piloterne.

Afkørslerne bliver anlagt med en afstand på 1140 meter for afkørslen overfor TWY1H, og ca. 1800 meter for afkørslen overfor 04LC-TWY1. Det forventes, at de planlagte afkørsler vil kunne betjene hovedparten af de fly, der kunne tænkes at

lande på bane 22R, eksempelvis F50, B737, MD80 og DC9, der står for 72,7% af operationerne i Kastrup.

Afkørslen der i første etape bliver bygget, overfor TWY1H, anlægges med en stigning på 1,89% fra station 167,65 til station 328,44, der dække stort set hele. Hældningen er indlagt for at gøre benyttelsen af afkørslen større.

Det er ifølge N. C. Andersen (SLV) og B. Zinch (KLH) blevet tilkendegivet fra SAS, at deres Fokker 50 kan bruge denne afkørsel, og deres DC9/MD80-typer i de "fleste" tilfælde vil kunne benytte sig af afkørslen.

Når udbygningen af hurtigafkørslen på bane 22R før Engelsvej er udført, vil denne kunne afløse afkørslerne af TWY1H. Besparelsen i baneopholdstid må kunne sidestilles de tidsbesparelser på 7,7 sekunder.

OPNÅELSE AF SEPARATIONSNEDSÆTTELSE.

På nuværende tidspunkt er der ikke belæg for en nedsættelse af separationsafstanden mellem landende fly i Kastrup Lufthavn, når den samlede flyflåde betragtes. Den eneste flytype der når under kravet om maksimalt 50 sekunders baneopholdstid i gennemsnit er Fokker 50.

Forhold der vil begrænse effekten af en nedsættelse af separation mellem disse fly er, at der på nuværende tidspunkt ikke sorteres mellem de landende fly. Dette bevirker at der ikke kommer en længere følge af Fokker 50 fly, hvor kapacitetseffekten vil få en betydning.

En sortering af landende fly i større eller mindre grupper efter størrelse og karakteristika, sammen med en optimering af landingsprocedurerne, ville om muligt give den ønskede kapacitetseffekt. Dette må dog undersøges nærmere i en række simulationer. Af andre forhold der vil være med til at forbedre den gennemsnitlige baneopholdstid er en bedre kontrol af flyene med bedre teknik og software, samt bedre information omkring afkørslernes indflyvningskriterier til piloter der ikke er kender lufthavnen.

Alt tegner på at optimering af det eksisterende system vil betyde, at de nuværende separationer kan lempes, således at det giver en større fleksibilitet under landinger med en forøget landingskapacitet til følge. Der skal derfor satses på videreudvikling, simulation og undersøgelser, der kan skabe den nødvendige kapacitet.