

COPENHAGEN BUSINESS SCHOOL 2013

KANDIDATAFHANDLING

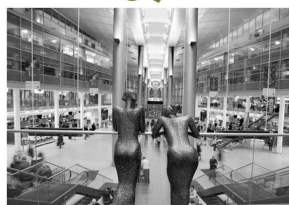
Cand.merc.(mat.)

Passenger Recovery Problem ved større forstyrrelser

Passenger Recovery Problem during major disruption

Lisa Eisø Illum

Vejleder:
Hans Keiding



13. juni 2013

180.948 anslag/
79,5 normalsider

Indhold

1	Resumé	3
2	Indledning	4
2.1	Problemformulering	4
2.2	Afgrænsning	5
3	Større forstyrrelse	6
3.1	Hvad er forstyrrelse	6
3.1.1	Knaphed	6
3.1.2	Forstyrret passager	7
3.2	Vejr forstyrrelse	7
3.2.1	Orkaner	7
3.2.2	Vintervejr	10
3.3	Naturfænomener	12
3.3.1	Vulkaner	12
3.4	Usædvanligt store forstyrrelser	13
3.4.1	11. september 2001	13
3.4.2	Eyjafjallajökull	14
3.5	Potentiale for forstyrrelse	15
3.6	Force majeure	16
3.7	Opsamling af større forstyrrelse	17
4	Planlægning	18
4.1	Ruteplanlægning	18
4.2	Flåde	19
4.3	Vedligeholdets rute	21
4.4	Mandskabs planlægning	21
4.4.1	Duty	22
4.4.2	Parring	24
4.4.3	Mandskabs parring	25
4.4.4	Roster	27
4.4.5	Overgangsfasen	29
4.4.6	Mandskabs opsamling	29
4.5	Set Partitioning Problem	29
4.5.1	Mængdeopdeling	30
4.5.2	SPP Model	33
4.5.3	Shortest Path Problem	34
4.6	Robusthed	35
4.7	Opsamling af planlægning	36

5	Recovery	38
5.1	Recovery generelt	38
5.1.1	Recovery muligheder	38
5.1.2	Airline Operations Control Center	39
5.2	Litteratur - Passenger Recovery Problemet	40
5.2.1	PRP løses efter genopretningsplan	40
5.2.2	Integreret model	41
5.3	DPM Disrupted Passenger Metric model:	42
5.3.1	Model	43
5.3.2	Bibetingelser	44
5.3.3	Tilføjelse i modellen til de større forstyrrelser:	51
5.3.4	Test og resultater af DPM i artiklen	52
5.4	Forskellige PRP situationer	54
5.4.1	Forudsætninger	54
5.4.2	Trafikstyrelsen	55
5.4.3	SAS	56
5.4.4	Fastsættelse af omkostning	59
5.4.5	Potentialet for forstyrrelse på de udvalgte dage	60
5.4.6	Forskellige større forstyrrelser	61
5.5	Opsamling af recovery	77
6	Konklusion	78

1 Résumé

The following master thesis is about the Passenger Recovery Problem in the Airline Industry.

When a major disruption occurs in airline schedules, it is necessary to recover the schedule. Usually with the least amount of disruptions in the fastest way possible. The recovery process involves first recovering the aircraft schedule, then the crew schedule and then lastly the disrupted passengers.

There will be a short explanation about the major disruptions and the schedule planning process to better understand the recovery problem.

Because the recovery process is based on recovering the smallest resource first and then lastly to recover the passengers, the cost of recovery could become substantial every time there is a major disruption. Small savings for the aircrafts and crew, when changing flights, might amount to great loss because of even greater passenger costs.

So by shaping the Aircraft recovery problem, not only with the operations costs of aircrafts, but also crew and passengers costs nonetheless, better recovery decisions can be made.

To test this, the Disrupted Passenger Metric model DPM by Bratu & Barnhart is thoroughly examined concerning restrictions, qualities and results.

Flight statistics on actual days of operations by SAS flights through Copenhagen Airport is analysed and compared to the DPM model under several prerequisites.

Analysis of these days, will show that improvement might be possible, when recovery also is based on passenger cost.

2 Indledning

I april 2010 dækkede en askesky fra Eyjafjallajökull en stor del af det Nordeuropæiske luftrum. I flere dage blev flyvningerne i området grounded. De mange aflysninger gjorde, at flere millioner mennesker, primært i Europa, strandede. Selv flere dage efter luftrummet blev genåbnet, var der aflysninger i flytrafikken.

Selvom Eyjafjallajökull var inspiration til kandidatafhandlingen, er den blot et eksempel på en usædvanlig stor forstyrrelse som meget sjældent indtræffer.

Hvert år, er der derimod flere begivenheder, som har potentiale for at skabe større forstyrrelser for flytrafikken.

Flyplanen, som består af flere dele, er planlagt hver for sig. Først ruterne, flyene og mandskabet. Når større forstyrrelser opstår, kan flyplanen ikke fortsætte som den er planlagt. Fly, mandskab og passagerer befinder sig ikke nødvendigvis de rette steder. Det bliver derfor nødvendigt at genoprette planen. Flyplanen bliver typisk genoprettet i samme rækkefølge som den er planlagt. Først fly, så mandskab og så tilsidst passagererne.

Når der genoprettes, medfører det ændringer i planen og det fører ofte til yderligere driftsomkostninger, endvidere vil ændringerne ofte påvirke passagerernes rejseplaner. Dette vil også føre til yderligere omkostninger.

Hvis planen i stedet, blev genoprettet med større opmærksomhed på passageromkostningerne, kunne omkostningerne ved større forstyrrelse måske reduceres.

2.1 Problemformulering

Det store spørgsmål bliver så:

Hvordan løses Passenger Recovery Problemet bedst muligt ved en større forstyrrelse?

For at kunne løse det bedst muligt, er det nødvendigt at vide:

- Hvad større forstyrrelser er.
- Hvordan flyvningerne er planlagt.
- Hvad der forstås ved bedst muligt.
- Hvilke muligheder der er til at genoprette.

Det er nødvendigt at vide hvad større forstyrrelser er, for at vide hvordan de opstår og hvad der gør dem til forstyrrelser. Derfor bliver flere eksempler på naturlige, som ikke-menneskeskabte, begivenheder beskrevet og hvad der gjorde at de førte til større forstyrrelser. Da det er meningen, at genopretning påbegyndes så snart der er en afvigelse,

er det nødvendigt at vide om der er potentiale for forstyrrelse. Her er de tre faktorer for potentialet for forstyrrelse for flytrafikken vigtige.

Flyplanlægning bliver gennemgået, for at få en større forståelse for hvor kompliceret planlægningen er. Det vigtigste her er planlægningen af ressourcerne; fly og mandskab. Den mindste ressource er fly, hvorfor den planlægges først. Et led til at mindske forstyrrelser, er robusthed i planen, men selv robusthed vil ikke kunne forhindre større forstyrrelser.

Til genopretning, eller Recovery som den hedder i litteraturen, nævnes andres værker på Passenger Recovery Problem området.

Her bliver *bedst mulig* også forklaret. Da der skal genoprettes hurtigt, fordi situationen fortsat kan ændre sig, er det nødvendigt at finde en løsning på problemet meget hurtigt. Den bedste mulige løsning, er derfor en løsning, som kan findes på kort tid, med den mindste omkostning.

Disrupted Passenger Metric modellen DPM af Bratu & Barnhart udvælges som et værktøj til genopretning. Den er baseret på genopretning af fly og inkluderer omkostninger til passagerer og mandskab i visse situationer. Modellen bliver gennemgået, resultater og begrænsninger analyseret. Ændringer og yderligere bibetingelser bliver tilføjet til modellen til større forstyrrelser, eksempelvis når kapaciteten er begrænset.

Dage med begivenheder som potentielt kunne give større forstyrrelser udvælges.

Regularitetsstatistik for SAS flyvninger, igennem Københavns Lufthavn, bliver analyseret og vurderet i forhold til om modellen kunne bruges til at forbedre genopretningen, under de givne forudsætninger.

2.2 Afgrænsning

Der er flere menneskeskabte begivenheder, som kan give større forstyrrelser. Strejker er en af disse, men de vil ikke blive gennemgået her.

Selvom Eyjafjallajökull har være inspirationen, vil recovery i de usædvanlig store forstyrrelser ikke blive diskuteret. De to usædvanligt store forstyrrelser, bliver beskrevet for at se omfanget i forhold til de andre større forstyrrelser.

De dage hvor en begivenhed reducerer kapaciteten fuldstændigt, er det ikke muligt at genoprette planen. Dage hvor denne situation opstår er derfor ikke i de valgte eksempler.

Den anden model af Bratu & Barnhart er ikke hurtig nok til at løses problemet og kan derfor ikke bruges til de udvalgte eksempler.

3 Større forstyrrelse

For at kunne genoprette efter større forstyrrelser, er det nødvendigt at vide hvad større forstyrrelser er og hvordan de opstår. Flere forskellige eksempler på naturlige begivenheder, som har ført til større forstyrrelser, bliver gennemgået.

De to største, i forhold til forstyrrelse af flytrafikken, er med som sammenligning. Det var 9/11, terrorangrebet i New York den 11. september 2001 og udbrudet af Eyjafjallajökull i april 2010.

3.1 Hvad er forstyrrelse

Disruptions, som de hedder i litteraturen, fremkommer af forskellige grunde. Ifølge Rosenberger m.fl. [31] tilbage i 2003, er 75% af forstyrrelser opstået på grund af vejret. Mindre forstyrrelser kan give små forsinkelser. Jo større forstyrrelsen er, jo større potentiel effekt kan den have på flytrafikken. I værste fald kan det føre til flere afflysninger af fly og endda lukninger af lufthavne.

Definition 1. *En forstyrrelse er en begivenhed, som gør at man må afvige fra planen.*

Det er ikke sikkert, at et vejrphænomen vil skabe en forstyrrelse.

3.1.1 Knaphed

Bratu og Bernhart [9] deler årsagen til forstyrrelser op i to primære grupper. Knaphed hos flyselskabet eller i lufthavn/luftrum:

1. Knaphed hos flyselskabet på ressourcerne.
 - Hvis der mangler et fly til en afgang.
 - Hvis der mangler mandskab.
2. Knaphed i lufthavnen eller luftrummet.
 - Hvis der er begrænset kapacitet i luftrummet.
 - Hvis der er begrænset kapacitet i lufthavnen, typisk på landingsbanerne.

Den første gruppe, er situationer flyselskabet har mulighed for at undgå eller har mulighed for at gøre noget ved. Her kan man muligvis undgå nogle situationer med robust planlægning. Se afsnit 4.6 på side 35. Vejrphænomener kan også påvirke første gruppe. Eksempelvis, kan der bliver knaphed i mandskab og fly, hvis de stadig befinder sig i en anden lufthavn.

I den anden gruppe, er det primært uden flyselskabets indflydelse, hvor meget kapacitet der er til rådighed. Til gengæld skal flyselskabet vælge hvilke afgang som skal afgå og ankomme til lufthavnen eller hvilke flyvninger som skal omdirigeres i akutte tilfælde.

De større forstyrrelser opstår oftest som følge af en knaphed i gruppe 2, som forplanter sig og også giver en knaphed i gruppe 1. Flere eksempler på dette, er de naturlige begivenheder som vejr- og natur-fænomener på henholdsvis side 7 og 12.

3.1.2 Forstyrret passager

En forstyrret passager vil, ud fra den tidligere definition om disruption, være en passager hvis endelige rejseplan afviger fra den først planlagte. Det er ud fra flyselskabets synspunkt, således at kun ændringer i flyveplanen fra flyselskabets side vil resultere i en forstyrrelse for passageren.

En passager der ændrer sin egen rejseplan før planlagt afgang vil ikke være en forstyrret passager. Den nye rejseplan er nu den planlagte.

I følge definitionen i Bratu & Barnhart [9] er en forstyrret passager en som skal på en ny rejseplan enten hvis en flyvning er blevet aflyst eller en forsinkelse gør at denne ikke når sit tilslutningsfly.

En forsinkelse uden ændring i rejseplan gør ikke en passager forstyrret. -Dog kan det stadig være nødvendigt med compensation.

3.2 Vejr forstyrrelse

Et eksempel på vejr forstyrrelse, fra Pejovic m.fl. [29], er tåge i Heathrow Lufthavn i England. Tågen skaber forstyrrelser i større og mindre grad. I tilfælde hvor tågen hurtigt fordamper igen inden for få timer, som er det hyppigste tilfælde, er det lettere at tilpasse flyplanen uden større forstyrrelser. Ofte vil det være sådan, at lufthavnen ikke lukker men blot har længere i mellem afgang og landing af sikkerhedsmæssigt hensyn.

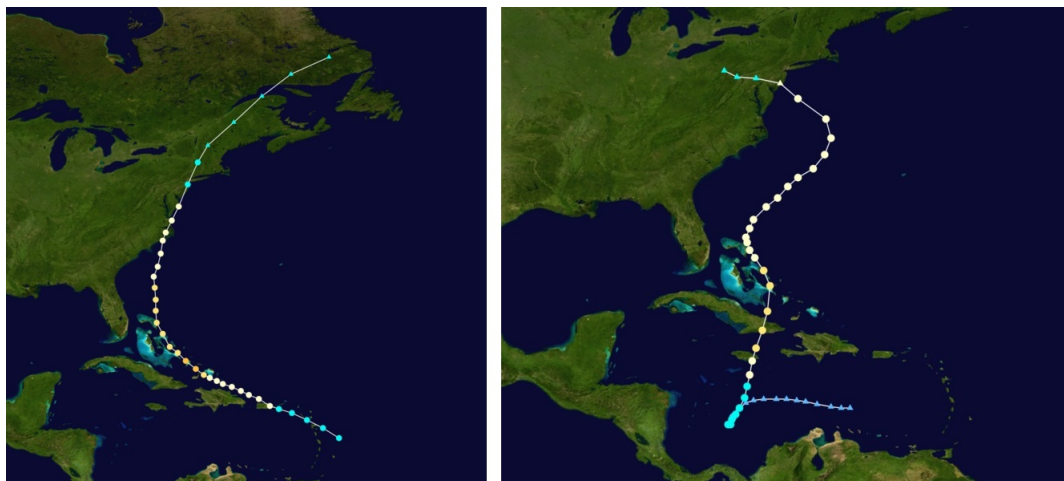
Dog var der et tilfælde i julen 2006, hvor tågen var vedholdende og gav mange aflysninger. De to værste dage var den 20. og 21. december hvor kapaciteten på start- og landingsbanerne blev halveret. Omkring 30% af flyvningerne blev aflyst. British Airways aflyste alle indenrigs flyvninger og en stor del af de korte udenrigs flyvninger, i dette tilfælde. Flyvninger med lange ruter blev prioriteret.

Der er mange eksempler på forskellige vejrfænomener som påvirker flytrafikken, men orkaner og vintervejr, er umiddelbart de to hyppigste til at skabe store forstyrrelser. I Nordeuropa er det primært vintervejr.

3.2.1 Orkaner

Hvor meget en orkan påvirker flytrafikken er typisk betinget af størrelsen på orkanen og hvor stort et område den bevæger sig over. Men vigtigst er det, hvor den rammer.

De to største i forhold til forstyrrelse af flytrafikken i Nordamerika var efter effekt; Sandy i oktober 2012 og Irene i august 2011. Begge var tropiske storme som blev til orkaner i det Caribiske Hav og ramte Nordamerikas østkyst.



Figur 3.1: IRENE OG SANDYS REJSE.
Fra wikipedia.org

I figur 3.1 er forløbet af Irene til venstre og Sandy til højre. Bemærk; det er ikke samme kortudsnit endda ikke samme skala, da ruten er i fokus. De to lyseblå er vinde af stormstyrke. De hvide, gule og orange er af orkan styrke, henholdsvis kategori 1, 2 og 3. Begge var højst kategori 1 på Østkysten og mest kun af stormstyrke.

Sandy startede som storm omkring mandag den 22. oktober 2012, blev opgraderet til orkan den 27. oktober og varede indtil onsdag 31. oktober. USA's østkyst blev ramt den 28. oktober af kraftig vind, vand og derefter orkanen som aftog i styrke indtil stormstyrke. Stormen stilnede af over de næste dage, som den bevægede sig ind i landet. Flere lufthavne lukkede og mange fly blev aflyst. Det var værst omkring staten New Jersey hvor stormen gik i land og New York City nordfor. De tre største lufthavne i området JFK, Newark og La Guardia, var hårdt ramt af stormen og følgevirkningerne. Alle tre var lukket hele den 29.-30. oktober og på grund af vand på landingsbanerne var La Guardia også lukket den 31. oktober og åbnede med kapacitetsbegrænsning den 1. november. Vest for de to stater blev Philadelphia Internationale Lufthavn også lukket den 29. og 30. oktober.

Oktober/ November	Søndag 28	Mandag 29	Tirsdag 30	Onsdag 31	Torsdag 1	I alt
Aflyste fly	1.300	7.884	7.074	2.899	572	19.729

Tabel 3.1: AFLYSTE FLY I FORBINDELSE MED SANDY
Fra FlightAware.com

I tabel 3.1 er opskrevet, hvor mange flyvninger der blev aflyst i dagene op til 1. november ifølge FlightAware.com¹. Tallene blev rapporteret torsdag morgen og de 572 aflysninger er de flyvninger, som foreløbigt var aflyst.

Irene begyndte den 20. august 2011, blev opgraderet til en orkan den 21. og varede til 29. august. De tre lufthavne omkring New York lukkede omkring middagstid den 27.

¹website som samler flystatistik for Nord Amerika og 40 andre lande

august og genåbnede i løbet af formiddagen den 29. august.

Philadelphia International Airport var lukket omkring halvdelen af dagen den 28. august ifølge FlightAware.com blev mindst 13.416 fly aflyst fra lørdag den 27. til mandag den 29. august.

Hvor mange flypassagerer der blev påvirket af de to orkanener, har ikke været i fokus da den generelle ødelæggelse en orkan eller kraftig storm gør, i stedet har været fokus.

En anden webside, Flightstats.com, har lavet en liste over de naturfænomener i Nordamerika, som har aflyst flest fly over de sidste 7 år. De to orkaner Sandy og Irene er henholdsvis nr. to og fire på listen, se tabel 3.2.

	Antal aflyste flyvninger	varighed
North American Blizzard	22.441	5-14. februar 2010
Hurricane Sandy	20.254	27-31. oktober 2012
Southeast Ice Storm	12.291	10-13. januar 2011
Hurricane Irene	12.158	24-29. august 2011
Hurricane Ike	10.048	1-14. september 2008

Tabel 3.2: AFLYSTE FLY TIL OG FRA NORDAMERIKA I FORBINDELSE MED ENKELTE VEJRFÆNOMENER I USA

Fra FlightStats.com

Det er ikke de samme tal, som noteret på FlightAware.com, hvilket kan forklares ved at de to virksomheder ikke nødvendigvis har data fra alle eller samme flyselskaber. FlightStats.com angiver i 2010 at have omkring 99,5% af alle flyvninger i USA og dække mere end 86% af flyvninger over hele verden, FlightAware.com skriver kun at have mange forskellige kilder til live data.

Det giver et meget godt billede af, hvor omfattende de to begivenheder var i Nordamerika uanset hvilke tal der ses på. Tal fra FlightAware.com er kun flyvning til og fra Nordamerika, så der kan være flyvninger andre steder i verden, som er blevet aflyst fordi forstyrrelsen har forplantet sig ud i systemet, og der dermed er blevet knaphed i ressourcerne i andre lufthavne.

Det er desuden værd at bemærke, at orkanen Katrina er nummer 8 på listen fra FlightStats.com med kun 3.939 aflyste fly. ifølge Blake m.fl [8] har Katrina den uheldige rekord at være den mest ødelæggende i USA² med en omkostning på \$108 mia. Det er mere end tre gange så meget som orkanen Ike, som er den næstmest ødelæggende med \$29,5 mia og er den sidste i tabellen ovenfor. Envidere har Katrina også rekorden som den mest dødelige i nyere tid i USA. (De to mest dødelige orkaner var i 1900 og 1928 med henholdsvis mindst 8000 og 2500 ofre.)

Sandy og Irene indtraf efter rapporten, men overgår ikke Katrina i hverken dødsfald eller ødelæggelse. Alt efter hvordan man opgører omkostningerne ved orkanerne, er det

²Uden at korrigere for inflation

sandsynligt at omkostningen ved Sandy overgår Ike, da flere artikler estimere Sandys ødelæggelser til at koste mellem \$30-60 mia. Irene er vurderet til mellem 7-16 mia. alt efter hvordan omkostningerne opgøres.

Af de fire nævnte orkanener er der ingen sammenhæng mellem den skade de forårsagede og antal aflyste fly/forstyrrelse af flytrafikken. Den mest ødelæggende orkan Katrina, var den med færrest flyaflysninger. Den mindst ødelæggende af de fire var Irene, som var den næstmest forstyrrende orkan.

En af grundene til at Irene og Sandy havde så stor betydning for flytrafikken kan være fordi de ramte østkysten. Blandt andet New York, med sine tre store lufthavne, er et knudepunkt for flytrafik til og fra Nordamerika over Nordatlanten. Hvorimod Katrina og Ike ramte det sydøstlige af USA men undgik Atlanta i Georgia, som har en af verdens største lufthavne, og undgik dermed de største lufthavne.

3.2.2 Vintervejr

Snefald og andet vintervejr kan også skabe forstyrrelser i flytrafikken. I Nordamerika er det, sammen med orkaner, den hyppigste grund til større aflysninger og i Europa hænder det at større aflysninger sker af denne grund.

Fra tabellen på side 9 står der at de to værste vintersituationer de sidste 7 år, i år 2010 og 2011, førte til aflysninger af henholdsvis 22.441 og 12.291 flyvninger. Den værste var "den Nordamerikanske snestorm". Det var rent faktisk to forskellige storme, med nogle dages mellemrum, som bevægede sig fra det sydlige USA nord/øst på, hen over østkysten. Igen var det fordi snestormene ramte østkysten, med de mange lufthavne og meget trafik, at aflysningerne blev så mange. Men også fordi det var to snestorme som ramte så tæt på hinanden.

I artiklen af Merkert & Mangia [26] ser de på forstyrrelser afledt af ekstreme vinterforhold. I Norge er der ofte snefald og kolde vintre. Især i det nordlige Norge, men også i Oslo Lufthavn som har oplevet to nedlukninger om vinteren. Begge varede blot et par timer og var 1. februar 2008 og 7. februar 2009. Snedybden målt kl. 7 om morgenen³, på de to dage var 14 og 47 cm respektivt ifølge yr.no, som får data fra Meteorologisk Institut i Norge. Derudover har Oslo samlet haft 1,58 meter sne i vinteren 2010/2011 som ikke medførte lukning af lufthavnen.

Heathrow var derimod lukket i 39,5 timer i vinterhalvåret 2010/2011 på grund af væsentlig mindre sne. Fra [26].

Den værste periode var december 2010. Det særlige ved snefaldet var, blandt andet, at der kom helt op til 7 cm på en enkelt time og temperaturen var meget lav i en periode på næsten en uge. Det udstyr lufthavnen brugte til at af-ise fly og rydde landingsbanerne, var ikke tilstrækkeligt til at takle den usædvanlige situation og kommunikation mellem de forskellige enheder, (lufthavn, flyselskaber og passagerer) var mangelfuld. Hvilket førte til de store forsinkelser og mange aflysninger.

³Målt ved målestationen Ullensaker 1,7 km fra lufthavnen

Fra rapporten af Begg m.fl. [7] som detaljeret beskriver situationen, står der at lufthavnen lukkede den 18. december fra kl. 11.30 på grund af snefald samme dag. Nogle flyvninger fandt sted den 19. december. Omkring 33% den 20. december og antallet blev øget indtil begge landingsbaner åbnede kl. 16.30 den 21. december. Den 22. december var driften tilbage til normal og 70% af flyvingerne blev gennemført. Den 23. december var gennemførte flyvninger på 93%. Samlet blev over 4.000 fly aflyst til og fra Heathrow.

Ifølge [26] er der konsensus om, at lufthavns ledelsen i Heathrow ikke var forberedte på hvor meget sne der ville komme og at vinteren 2010 var den koldeste til dato. I dette tilfælde var det en usædvanlig mængde sne og de kolde frostgrader i perioden, som skabte en forstyrrelse som varede i flere dage.

Vintervejret som ramte Heathrow og andre steder i Europa var også forbi Københavns Lufthavn i Kastrup. Den 23. december var dagen med de højste forstyrrelser.

I Københavns Lufthavn var problemet, at flyene stod i kø til af-isning og at start- og landings-banerne hyppigt skulle ryddes, ikke kun på grund af snefald men også fygning. To baner er normal i brug på samme tid, en til start og en til landing. Fygningen gjorde, at kun en enkelt bane kunne bruges af gangen. Operationerne blev så foretaget på den ene bane mens den anden blev ryddet. Når den var ryddet fortsatte operationerne på den startbane og rydningsarbejdet fortsatte på næste. Uden fygning, vil rydning kun være nødvendigt i perioden med snefald og begge baner ville så være klar til drift efterfølgende.

Fygning var ikke det eneste problem, da flyene også skulle af-ises inden afgang. Københavns Lufthavns trafikchef Dan Meincke, fortalte at flyene stod i kø til af-isning og at de derefter skulle lette indenfor 20 minutter eller til af-isning igen.⁴ Samlet blev 19 afgang og 22 ankomster aflyst fra CPH.

Det værste tilfælde af vintervejr Københavns Lufthavn har opleveret i nyere tid, var dog den 9/12-2012. Snefald og primært den specielle vindretning gjorde, at kapaciteten på start- og landings-banerne blev reduceret væsentligt. Vindretningen gjorde at blot en enkelt bane var i brug og denne skulle også ryddes periodevis. Vinden skiftede dog i løbet af dagen og da to baner kunne tages i brug samtidigt, begyndte situationen at lysne. Sammenlagt blev 28 og 32 flyvninger aflyst i Kastrup, henholdsvis til og fra København. Det svarer til 11,7% af ankomsterne og 12,1% af afgangene. Hvis vinden ikke havde skiftet, ville det have skabt endnu større forstyrrelser.

Sammenligningen af Oslo, København og Heathrow viser at det ikke nødvendigvis er mængden af sne som skaber forstyrrelser, men hvordan situationen bliver behandlet. Hvor eksempelvis Oslo Lufthavn havde udstyret og rutinen til at reagere i tilfælde med meget sne, manglede Heathrow lufthavn samme i december 2010. Derfor er det ikke altid, bestemte vejrforhold som skaber forstyrrelser, men vejrforhold som er usædvanlige for lufthavnen eller tilfælde hvor vejrfænomenet er kraftigere. Dog kan usædvanlige tilfælde, som uheldig vindretning sammen med snefald og fygning også give forstyrrelser.

⁴ifølge artiklen "Københavns Lufthavn: »Vi får alle hjem til jul«" fra Politiken

3.3 Naturfænomener

En anden type begivenhed, som muligvis indgår i vejrddefinitionen i litteraturen er naturfænomener. Teknisk set, er naturfænomener ikke relateret til vejret. Naturfænomener er som eksempel vulkanudbrud, jordskælv og tsunamier, som kan fremkomme af de to første nævnte. Dog er det muligt at man i litteraturen har samlet alle vejrforhold og naturfænomener under begrebet vejr. Da vulkanudbrud er det, af naturfænomenerne, som påvirker flytrafikken mest, er det beskrevet yderligere nedenfor.

3.3.1 Vulkaner

Hvert år kommer omkring 60 vulkaner i udbrud ifølge Langmann m.fl. [23]. Der er stor forskel på vulkanudbrud, da der er stor forkel på vulkaner. De findes i mange størrelser og nogle er endda under vand. Vulkanudbrud kan forstyrre flytrafikken på flere måder.

Ifølge Guffanti m.fl. [16] i artiklen fra 2007, er mindst 101 lufthavne i 28 lande blevet påvirket af vulkanudbrud fra 1944 til 2006. I alt var der 171 gange, hvor en af disse lufthavne blev forstyrret. Ydermere beskriver de, at der gennemsnitlig er 5 lufthavne om året, som påvirkes af vulkanudbrud siden 1980. Kæmpe udbrud, hvor befolkningen også evakueres tæt på vulkanen, vil naturligvis påvirke en lufthavn beliggende i samme zone, men det er en sjælden begivenhed. Det som primært påvirker flytrafikken er aske, både nedfald og i luftrummet, men også gas og lava har i nogle tilfælde påvirket lufttrafikken.

I tilfælde med nedfalden aske kan det både forringe sigtbarheden ved afgang og landing og gøre landingsbanerne glatte. Hvilket kan føre til reducere af åbne startbaner, som eventuelt skal ryddes hyppigt. Nedfalden aske, kan endda ødelægge bygninger og fly, -hvis de ikke er i hangarer.

På samme måde kan aske og andre partikler i luftrummet potentielt ødelægge fly eller stoppe flymotorerne. I de tilfælde bliver luftrummet lukket, indtil koncentrationen er lav nok til forsvarlig gennemflyvning.

De længste tilfælde af lukning af lufthavne er ifølge Guffanti m.fl. [16] i 1980'ne. I maj 1980 udbrød Mt. St. Helens og Grant County Airport i staten Washington lukkede i 15 dage. To år senere udbrød Galunggung og Bandung Lufthavn i Indonesien lukkede i 18 dage. Ifølge Miller [27] blev 80 fly beskadiget da de fløj igennem askeskyen fra Galunggung og nogle var i fare for at styrte ned på grund af motorproblemer. Det mest omfattende tilfælde var da Eyjafjallajökull udbrød i 2010, tre år efter artiklen blev skrevet, da asken påvirkede flytrafikken i flere lande, se mere på side 14.

Det er ikke kun lufthavne i de lande hvor vulkanen er, som bliver påvirket. I 1991 da Mount Hudson i Chile udbrød, landede aske i lufthavne 1543 km væk ifølge Guffanti m.fl. [16].

Typisk har lufthavne, hvor vulkanudbrud sker hyppigt, nødplaner og tilpasser sig lettere end andre lufthavne fordi det næsten er en normal hændelse. De steder, bliver vulkansk aktivitet nøjere overvåget og flyvninger tilpasset efter risikoen. Områder som ikke er vant

til vulkansk aktivitet kan have sværere ved at tilpasse sig situationer med vulkanudbrud.

Selvom der i gennemsnit skulle være 5 vulkaner om året som påvirker flytrafikken, vil ikke alle vulkaner skabe lige store forstyrrelser. Graden af forstyrrelse afhænger blandt andet af vulkanens størrelse, udbrudets varighed og beliggenhed.

3.4 Usædvanligt store forstyrrelser

For at se de større forstyrrelser i perspektiv, nævnes de to usædvanlig store forstyrrelser som er opstået i flytrafikken. Terrorangrebet den 11. september 2001, er den eneste menneskeskabte begivenhed, og askeskyen fra Eyjafjallajökull er til dato den begivenhed som har forstyrret flest flyvninger.

3.4.1 11. september 2001

En af de værste forstyrrelser i USA kom den 11. september 2001, i form af en terrorhandling hvor flere fly blev kapret og luftrummet i Nord Amerika efterfølgende blev lukket. Tirsdag morgen kl. 8.46 og kl. 9.03 EDT⁵ i New York flyver to passagerfly ind i hhv. Nord og Syd Tårnet af World Trade Center. Kl. 9.37 bliver Pentagon ramt af et tredje fly og luftrummet over USA lukkes kl. 9.45 og alle fly i Nordamerikansk luftrum skulle lande i nærmeste lufthavn. Fly på vej til USA blev omdirigeret.

Ifølge Hättö & Hollmeier [19] i deres artikel om Lufthansa i 2001/2002 var luftrummet i USA lukket i fire dage. 23 Lufthansa-fly til og fra USA var allerede i luften med i alt 5000 passagerer da luftrummet akut skulle lukkes for trafik. Flyene blev omdirigeret til 7 forskellige steder, Bermuda øerne og Island og 5 byer i Canada.

Ifølge Eddington m.fl. [12] blev omkring 15.000 Amerikanske indenrigsfly groundet den 11. september og over 4.500 fly var allerede i luften.

Hvis gennemsnittet hver dag, var på omkring 20.000, ville mindst 80.000 flyvninger direkte være aflyst på grund af det lukkede luftrum. Hvor mange flyvninger der i alt blev aflyst, som følge af begivenheden, er uvist.

Mange af flyselskaberne i verden har afgang til og fra USA og blev derfor påvirket i de fire dage, og i de efterfølgende dage, alt efter hvor lang tid det tog at genoprette planen. Fra Yu m.fl. [36] aflyste Continental Airlines alle fly fra tirsdag den 11. september til fredag den 14. september. Bortset fra de allerede påbegyndte flyvninger inden luftrummet blev lukket. Hele ugen kørte flyselskabet programmer for at finde løsninger på fly og mandskab, til når luftrummet blev åbnet igen.

9/11 var en usædvanlig situation og en lignende situation vil sandsynligvis ikke ske igen. Op til da, var det den største forstyrrelse i flyhistorien og kan have forstyrret flere

⁵EDT (Eastern Daylight Time) er UTC-4 og sommertid i Danmark er UTC+2. I Danmark var klokken 14.46 og 15.03

end 8 millioner passagerer, hvis det antages at der rejste lige mange passagerer hver dag.

Dette er den ene af de usædvanlig store forstyrrelser fordi det drejer sig om lukning af et stort luftrum og flere lufthavne i flere dage.

3.4.2 Eyjafjallajökull

I marts 2010 startede vulkanudbrudet på det sydlige Island, efter flere måneders seismisk aktivitet. Eyjafjallajökull, som betyder ø-fjeld-gletsjer, som teknisk set ikke er en vulkan men en gletsjer beliggende på en vulkan, startede forsigtigt med et lille udbrud den 20. marts. Det bestod primært af lava og så ud til at lette trykket i knap en måned. Den 14. april kom det store udbrud, hvor store mængder aske blev sendt op i luften. Ifølge Read [30] blev asken sendt helt op i 10 kilometers højde. Meget af luftrummet i Europa blev lukket fra den 16. til den 21. april, hvilket inkluderede 313 lufthavne og 100.000 fly blev aflyst over hele verden. Askeskyen flyttede sig i starten af maj hen over det vestlige Europa og omkring 5.000 fly blev aflyst fra blandt andet Portugal, Spanien og Frankrig.

Ifølge Read [30] er det estimeret, at 7 millioner passagerer var strandet som følge af dette, hvoraf 6 millioner af dem var strandet i Europa. Per definition er de estimerede 7 millioner strandede passagerers flyvninger forstyrrede. Til gengæld behøver passagerer, hvis rejseplan er blevet forstyrret, ikke at være strandede. Potentielt kan askeskyen derfor have påvirket langt flere rejsende. De præcise tal for forstyrrede kontra strandede passagerer er ikke relevante. En uddybning af dette findes i bilag 1 på side 82.

I Danmark blev flytrafikken også påvirket i ovennævnte dage. Driften i Københavns lufthavn i Kastrup blev forstyrret fra den 15. til den 23. april. I tabel 3.3 er opskrevet hvor mange gennemførte og aflyste flyvninger der var fra og til lufthavnen fra den 15. til den 24. april.⁶

Dato		15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Fra	Gennemførte	161	0	0	0	0	0	205	276	274	212
	Aflyste	207	345	212	290	361	356	102	94	80	4
Til	Gennemførte	181	0	0	0	0	0	190	261	276	219
	Aflyste	185	353	231	269	361	357	123	105	85	12
Sum	Aflyste i %	53	100	100	100	100	100	36	27	23	4

Tabel 3.3: Gennemførte/aflyste fly i Kastrup lufthavn april 2010

Den 15. april var omkring halvdelen af flyvningerne aflyste og fra den 16. til den 20. april var alle fly groundet. Fra den 21. til den 23. begyndte flytrafikken op igen i Kastrup og aflysningerne faldt fra hhv. 36% til 27% og tilsidst 23%. Den 24. april var driften umiddelbart normal igen med samlet kun 16 aflysninger.

Det særlige ved Eyjafjallajökull var, at det var meget små partikler, en blanding af aske og vand fra gletcheren. Og da det blev sendt så højt op i atmosfæren blev effekten

⁶Fra stat.trafikstyrelsen.dk

langt større end forventet for så lille en vulkan.

Flere steder er situationen blevet beskrevet som værre end 9/11 og det kan der være to grunde til. Den ene er, at der var marginalt flere fly som blev aflyst under vulkanudbruddet og fordi der under 9/11 var kontrol over lukning af luftrummet. Da luftrummet blev åbent igen over USA blev det varslet og al flyvning kunne påbegynde igen. I perioden med askeskyen var det vanskeligt at vurdere, hvor det var muligt at flyve og hvornår. Mange prøver og undersøgelser skulle foretages, før luftrummet pletvist blev åbnet og til tider lukket igen. Det gjorde processen at genoprette flyplanen vanskeligere.

Denne usædvanlige store forstyrrelse, havde så stort et omfang fordi en stor del af det nordeuropæiske luftrum var lukket over mange dage. Hvilket også førte til lukning af mange lufthavne og kan have skabt knaphed i lufthavne udenfor luftrummet.

3.5 Potentiale for forstyrrelse

Der kan være stor forskel på omfanget af en *større* forstyrrelse.

Graden vil afhænge af hvor mange potentielle flyvninger en lukning vil påvirke.

Kode	Lufthavn	Flyvninger	Passagerer (i mio.)	Daglig gns.
ATL	Atlanta, Georgia	923.996	92,4	2531,5
LHR	London, England	473.713	69,4	1297,8
FRA	Frankfurt, Tyskland	487.162	56,4	1334,7
JFK	Queens, New York	408.913	47,7	1120,3
EWR	Newark, New Jersey	410.013	33,7	1123,3
PHL	Philadelphia, Pennsylvania	443.236	30,2	1214,3
LGA	Queens, New York	365.870	24,1	1002,4
CPH	København, Danmark	253.713	22,7	695
OSL	Oslo, Norge	223.560	21,1	612,5

Tabel 3.4: Antal flyvninger og passagerer i 2011, (PHL dog 2012)

Tabel 3.4 er med de lufthavne nævnt tidligere plus ATL til sammenligning. Atlanta er den største enlige lufthavn i forhold til passagertrafik. Alle trafiktal er direkte fra de forskellige lufthavne og kan være opgjort forskelligt eksempelvis med eller uden anden lufttrafik, men giver et billede af hvor store lufthavnene er. Eksempelvis er der også 375 militære flyvninger inkluderet i Atlantas flyvninger.

De tre vigtigste faktorer til at bestemme, hvor stor forstyrrelse en begivenhed kan føre til er:

- Hvilket område bliver berørt af begivenheden
- Hvor meget bliver kapaciteten begrænset i området

- Varigheden af begivenheden

Tabellen er for de enkelte lufthavne og ikke lufthavns systemer. London og New York er eksempelvis områder med flere lufthavne tilknyttet. Hvis trafikdata for lufthavnene blev lagt sammen, ville begge områder have flere flyvninger og passagerer end Atlanta. Dermed kan en begivenhed, som rammer et af disse områder, give en større forstyrrelse, end hvis den rammer Atlanta. Omvendt vil en lufthavnsspecifik begivenhed i Atlanta forstyrre flere flyvninger end hvis den ramte andre lufthavne. Jo flere flyvninger som opererer i det berørte område, jo flere kan potentielt blive forstyrret.

En begivenhed kan føre til kapacitetsbegrænsning og i værste fald, lukning.

Jo højere begrænsning jo større vil en forstyrrelse typisk blive.

Jo flere dage en begivenhed varer jo værre kan forstyrrelsen blive.

Disse tre faktorer vil samme bestemme potentialet for den større forstyrrelse.

3.6 Force majeure

Som hovedregel har flyselskaber i EU en forpligtigelse til at hjælpe passagerer i forbindelse med forsinkelse eller aflysning. Siden februar 2005, da EU-forordning 261/2004 trådte i kraft, har passagerer følgende rettigheder.

Kort opsummeret fra trafikstyrelsen.dk:

Aflysning: enten en refusion af flybilletprisen eller en omlægning af rejsen hvortil kost og logi indgår, endvidere kompensation medmindre aflysning sker på grund af særlige omstændigheder.

Forsinkelse: hvis forsinkelsen er på 2, 3 eller 4 timer for henholdsvis op til 1500, 1500-3500 eller over 3500 kilometer, skal der tilbydes kost og eventuelt logi efter varighed af forsinkelse. Ved forsinkelse i mere end 5 timer, skal der tilbydes en refusion af flybilletprisen og eventuelt en returflyvning.

Og tilsidst skal passagerer kompenseres ved ankomster forsinket mere end tre timer, med mindre det skyldes særlige omstændigheder.

De større forstyrrelser, inden for EU som nævnt ovenfor, som især Eyjafjalljökull er særlige omstændigheder, hvor flyselskaberne ikke skal yde kompensation. Dog skal der stadig tilbydes en refundering af billetprisen eller en ombookning af flyrejsen, kost og logi indtil da.

Uanset om flyselskabet skulle være forpligtiget eller ej, kan høj service være en grund til at passagererne bliver hjulpet. I situationer hvor luftrummet er lukket og alle flyselskaber må aflyse deres flyvninger, kan passagererne ikke vælge at rejse med et konkurrerende selskab. Men hvordan flyselskabet har håndteret situationen, kan påvirke om de forstyr-

rede passagerer, vil vælge at rejse med det flyselskab igen.

Lovgivningen på området kan tilgengæld bruges til at fastsætte omkostningerne ved forstyrrelse.

3.7 Opsamling af større forstyrrelse

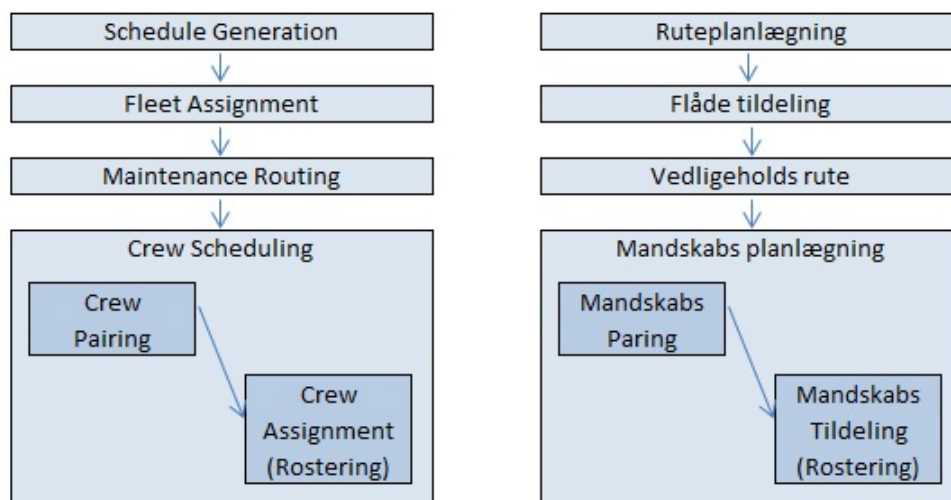
Større forstyrrelser kommer typisk af begivenheder som rammer luftrum og/eller lufthavne og giver knaphed i gruppe 2. Det kan derefter også påvirke flyvninger fra andre lufthavne da fly og/eller mandskab mangler. Graden af den større forstyrrelse afhænger af flere faktorer. Hvor mange flyvninger der er i området, hvor meget kapaciteten er begrænset og varigheden. Jo højere de tre faktorer er, jo større har forstyrrelsen potentiale til at blive.

Passagerer er kun forstyrrede, hvis rejseplanen bliver ændret på grund af aflysning eller et tilslutningsfly ikke kan nås.

Begivenheder som fører til større forstyrrelser opstår hyppigt, men det varierer meget hvor og hvilke der opstår. Eksempelvis har Københavns Lufthavn sjældent forstyrrelser på grund af orkaner og Atlanta Lufthavn har sjældent større forstyrrelser på grund af vintervejr. Begge lufthavne har dog oplevet den respektive begivenhed.

4 Planlægning

Flyplanlægning er en større proces. Ifølge Barnhart m.fl. [6] består planlægningsprocessen typisk af 4 dele i nævnte rækkefølge; flyplan, flådetildeling, vedligeholdsrute og mandskabsdeling, hvor den sidste består af to dele. I mandskabsplanlægning sættes flyvninger sammen til ture og derefter tildeles mandskabet nogle ture, hvilket giver hver medarbejder et skema. I Europa kaldes de endelige skemaer for rosters.



Figur 4.1: PLANLÆGNINGS RÆKKEFØLGE.

Venstre side af figur 4.1 viser rækkefølgen af planlægningen som i [6] hvor højre er samme, med oversættelserne på dansk.

Der kan være forskel på hvordan flyselskaber planlægger, men især de lidt større selskaber vil følge ovenstående model eller i hvert fald planlægge så alle fire grupper er taget hånd om.

4.1 Ruteplanlægning

I ruteplanlægning fastsættes de ruter som skal flyves og hvor hyppigt. Enten ved at maksimere profit eller strategisk, hvis flyselskabet som eksempel gerne vil dække et område bedst. Der kan ske ændringer i planen hen ad vejen, men det er vigtigt at der er fastsat hvilke strækninger, som skal betjenes og besluttet hvor hyppigt disse skal flyves. Der kan være stor forskel på hvor profitable ruterne er, hvor hyppigt de skal flyves og på hvilke tidspunkter. Ifølge [11] fastsættes tidsplanen mellem 1-5 år før.

4.2 Flåde

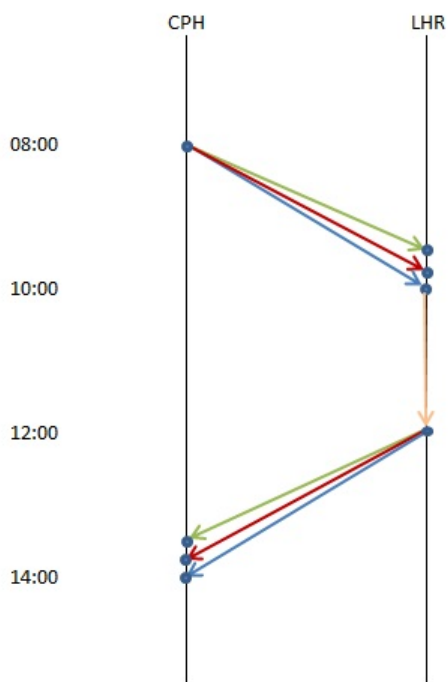
I flådetildelingsfasen, skal der besluttet hvilken type fly som skal servicere de forskellige ruter på forskellige tider. Flytyperne tildeles på bedst mulig måde primært i forhold til en forventet efterspørgsel.

Ifølge Sherali m.fl. [34] er det ofte en balancegang mellem “spilled” og “spoiled”, hvor man henholdsvis mister passagerer ved ikke at møde efterspørgslen og ikke fylder sæderne, ved at overstige den. I spilled vil driftsomkostningerne typisk være lavere og ved spoiled vil både indtjening og driftsomkostning typisk være højere. Hvilken taktik, der er mest profitabel varierer med flyvningerne og kommer meget an på variablene.

I denne fase vil man enten minimere omkostning og forsøge at dække efterspørgslen eller vælge at maksimere profit.

Da hovedmodellen senere, i passager recovery, er en udvidelse af en flådetildelingsmodel, bliver den beskrevet kort nedenfor. I Fleet Assignment Modellen af Hane m.fl. [18] minimeres omkostningen af flådetildelingen.

Modellen er netværksbaseret, hvor et punkt/en knude repræsenterer tid og sted og kanter kan forbinde flere af disse knuder.



En jorkant bruges til at forbinde to tidspunkter, men samme sted, for flådetyper som venter i lufthavne. En flyvningskant starter i noden for starttidspunkt og sted og afslutter i noden med sluttidspunkt og sted.

Da flyvetiden kan være forskellig for de forskellige typer i flåden, kan der være flere kanter som starter i samme node. De vil til gengæld ende i andre noder som angiver andre tidspunkter.

I figur 4.2 er startknuden i Københavns Lufthavn kl. 8 med tre mulige flådetyper. En flyvning til Heathrow ved London varer, i dette tilfælde, mellem halvdagen og to timer. Den orange er en jorkant mellem knuderne til den blå flådtype.

Figur 4.2: UDSNIT AF ET NETVÆRK. *Flyvninger fra to knuder med hver tre flyvninger*

N^k er alle knuderne og G^k er alle jordkanterne.

$O(k, n)$ er mængden af alle flyvninger som starter i knude n af flytype k .

$F(k, n)$ er tilsvarende, alle de flyvninger som slutter i node n for flytype k .

Jordkanter som starter/slutter i n betegnes ved henholdsvis n^+ og n^- .

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} c_i^k f_i^k \\ \text{ub} \quad & \sum_{k \in K} f_i^k = 1 \quad i \in I \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\sum_{i \in O(k, n)} f_i^k + y_{n^+}^k - \sum_{i \in F(k, n)} f_i^k - y_{n^-}^k = 0 \quad \forall k \in K, \forall n \in N^k \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \sum_{g \in CG(k)} y_g^k + \sum_{i \in CL(k)} f_i^k &\leq M^k \quad \forall k \in K, \\ f_i^k &\in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \\ y_g^k &\geq 0 \quad \forall g \in G^k, \forall k \in K, \end{aligned} \quad (4.3)$$

c_i^k er driftsomkostningerne minus forventet indtjening når flådtype k betjener flyvning i . f_i^k er lig 1, når flyvning i tildeles flådtype k og 0 ellers. Derved minimeres omkostningerne for tildeling af flådetyper til flyvningerne.

Bibetingelse 4.1 sørger for, at alle flyvninger tildeles en flådtype, ved at summen af alle f_i^k er lig én for hver flyvning.

Bibetingelse 4.2 sørger for flybalancen stemmer i alle knuder. $y_{n^+}^k$ er antallet af hver flådtype k som forlader node n . Tilsvarende er $y_{n^-}^k$ lig antallet af flådtype k som ankommer i node n . Dermed skal alle flyvninger som ankommer i noden plus de af flådetypen, som er på jordkanten, være lig antallet af flyvninger som afgår fra noden, plus de som forlader noden ad jordkanten.

M^k er antallet af fly af hver flådtype k . Der må ikke tildeles flere fly, på ethvert tidspunkt, af hver type end der er til rådighed. Balance 4.2 tidligere, sørger delvis for dette, ved at ankommende skal være lige afgående. Men det hjælper kun på, at der ikke forsvinder eller opstår fly. Så på et vilkårligt tidspunkt skal gælde at antallet af fly tildelt eller på jordkanten ikke er større end det tilgængelige antal. Til at tjekke dette bruges $CG(k)$ og $CL(k)$, som er mængden af henholdsvis jordkanter og flyvningskanter som krydser et vilkårligt valgt tidspunkt.

Bibetingelse 4.3 sørger dermed for, at summen af alle jordkanter og flyvninger, som krydser det valgte tidspunkt for hver flådtype, er mindre eller lig det samlede antal af flåde type k . Dette skal gælde for alle flådetyperne.

Beslutningsvariablen f_i^k , som angiver om en flådtype er tildelt en flyvning, er binær da den enten er tildelt eller ej. Den anden beslutningsvariabel y_g^k , som angiver hvor mange

af flåde type k som er på kant g , skal være positiv.

Ifølge Weide m.fl. [35], maksimeres profitten ud fra hvilke flytyper, der er til rådighed og andre begrænsninger. Derved møder man kun efterspørgslen hvis det er profitabelt. Sherali m.fl. [34] har modeller både med maksimering af profit og minimering af omkostninger.

4.3 Vedligeholdts rute

Når alle flyvninger har fået tildelt en flytype skal der laves ruter. Ved planlægning af vedligeholdts rute vil det antal fly af hver type, blive tildelt flyvninger, således at der også planlægges tid mellem flyvningerne til regelmæssige eftersyn i de lufthavne som udfører vedligehold. Det bliver også kaldt Aircraft Routing eller Aircraft Rotation problemet. På dette tidspunkt bliver det ikke fastsat, hvilket fly der flyver hvilken rute, men ruter bliver fastlagt for hver type. Antal ruter per type må ikke overstige antallet af fly til rådighed af hver type.

4.4 Mandskabs planlægning

Den mest omfattende del af planlægningen er af mandskab. Det er den næsthøjeste omkostning, lige efter fly og brændstof. Meget af litteraturen omhandler planlægning og optimering af netop dette, fordi der er en meget stor gevinst i en mulig besparelse, da det er et kompliceret problem med mange forskellige mulige løsninger. Mandskab planlægges ved at løse to problemer, som nævnt tidligere, mandskabs parring og rostering, -assignment i USA. Her skal man parre og tildele mandskab til flyvningerne på bedst mulig måde for at minimere omkostningerne. Men mandskab er ikke en homogen gruppe og hele processen ovenfor, bliver gjort for de forskellige mandskabsgrupper. Mandskab er delt op i enten cockpit eller kabinepersonale og hver gruppe kan være yderligere opdelt.

De to grupper bliver planlagt forskelligt, da der er forskel på egenskaberne de besidder. Typisk vil kabinemedlemmerne kunne servicere de fleste, hvis ikke alle fly og det vil ikke kræve meget mere end at tildele et bestemt antal personer per flyvning. Dog kan der, hos større flyselskaber være forskellige rang indenfor kabinepersonalet og vigtigst; nogle flyvninger kan have et krav om kabinepersonale af højere rang.

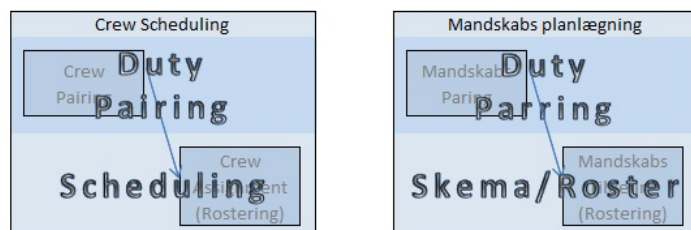
Cockpitpersonalet er ifølge Abdelghany m.fl. [1] delt op i Kaptajn, Styrmand og Second officer efter kvalifikationer og erfaring, hvor den højeste titel man kan få er Kaptajn. Ifølge Medard & Sawhney [25] kan der også være brug for en flymekaniker. Sjældent vil alle piloter kunne betjene alle fly i flåden, så ud over de tre forskellige titler, er der også variation i hvilke fly mandskabet kan betjene. Flåden deles derfor op i typer, eller flådefamilier hvis flytyperne kan grupperes. Flådefamilierne har blandt andet det til fælles, at de skal betjenes af samme antal cockpitpersonale af hver type. De forskellige flytyper's flyvninger skal så tildeles cockpitpersonalet.

Der er forskellige måder at gøre det på, men det skal gøres således, at hver eneste flyvning bliver bemannet med tilstrækkelig og kvalificeret cockpitpersonale. Nogle

flådefamilier kan eksempelvis have krav til en Kaptajn, en Styrmand og en tredje pilot, hvor man planlægger hver gruppe for sig. Den tredje kunne under særlige lange flyvninger, være en Relief-Pilot, så en af piloterne kan afløses i løbet af flyvningen. En mindre flåde med kun en flådefamilie vil kun have en gruppe at planlægge for.

De brugte eksempler her, vil typisk være simple og baseret på planlægning for mindre flådefamilier og færre cockpitgrupper.

Hvor flåden har betingelser i planlægningen således, at der bliver udført service tjek og vedligeholdelse med givne intervaller, har mandskab en række begrænsninger i forhold til deres arbejdstid. De er baseret på eventuel overenskomst, kontrakt, land og flyselskab. For piloterne kan der være begrænsninger hver dag, på hvor mange flyvninger, hvor længe de må flyve i alt, en minimum og maksimums tid mellem flyvninger og så videre. Mens nogle arbejdsbegrænsninger ikke må brydes, kan andre alene være forbundet med ekstra omkostning. Alle betingelser vil ikke blive gennemgået, men nogle få eksempler bliver nævnt.



Figur 4.3: MANDSKABS PLANLÆGNINGS RÆKKEFØLGE.

I større flyselskaber er der utrolig mange muligheder for at tildele mandskab til flyvninger og derfor bygger man problemet op således at der skal vælges optimale løsninger ud af de mulige løsninger. Det vil sige, at man først udregner mulige løsninger, som ikke overtræder arbejdsbegrænsningerne og derefter udvælger de bedste løsninger. Det gøres ved at man først danner duty perioder af flyvninger og derefter parring af duty perioder (duties) som kan udvælges til at udgøre den færdige plan. Se figur 4.3.

4.4.1 Duty

Flyvninger sættes sammen så de udgør en duty, som udgør en dags arbejde. En duty må ikke bestå af flyvninger som overlapper hinanden eller som ikke er forbundet ved samme lufthavn. Reelt er det bibetingelser for at sikre, at en person ikke er på to flyvninger eller i to forskellige lufthavne på samme tid. En flyvning skal altid ende i samme lufthavn før næste flyvning starter i samme lufthavn, hvis de to flyvninger skal være efter hinanden i en duty periode.

Der er også krav til hvor længe, der skal være mellem hver flyvning. Det kan være for mandskabets skyld, for at få hvile, eller specielt for hver lufthavn hvis den er særlig stor, således at mandskabet kan nå til næste fly i tide. Da en duty kan bestå af én flyvning, vil man som udgangspunkt have minimum lige så mange duties som flyvninger, hvis det ikke bryder nogle af reglerne. Det endelige sæt af mulige duty perioder bliver meget større end

antal flyvninger hvis begrænsningerne ikke er for strikse eller flyvningerne ikke varer for lang tid. Hvis en bestemt flyvning varer 9 timer, er det måske ikke muligt at kombinere lige den med andre i en duty periode, hvis arbejdstidsbegrænsningerne skal overholdes. Eksempler på restriktioner fra Guo m.fl.[17] baseret på et Europæisk flyselskab er: Typisk maksimal duty 10 timer. Overtids duty, højst 14 timer.

For senere at kunne vælge duties på bedst mulig måde, er der en omkostning forbundet med hver duty. Omkostningen regnes i tid da der er forskel på pilotløn og der ikke endnu er knyttet piloter til de forskellige duties. Fra Barnhart m.fl. [6] er omkostningerne per duty:

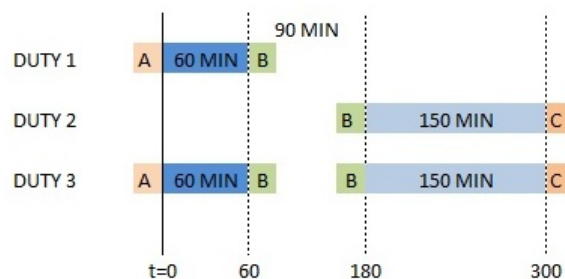
$$b_d = \max\{f_d * elapse, fly, min_guar\}$$

Hvor b_d er den største af de følgende tre forklaret nedenfor:

f_d er en fastsat brøkdelen af duty perioden fra start til slut, angivet ved *elapse*. Det er for at give tiden mellem flyvninger værdi. Hvis omkostningen ved flyvning såvel som ventetiden mellem flyvninger var den samme, ville det ikke være en brøk men $f_d=1$. Det svarer til at mandskabet blev betalt lige meget for at flyve og for at vente mellem flyvningerne. Hvis brøken derimod er tæt på nul, vil det betyde at omkostningen mellem flyvningerne var lille, og mandskabet ikke fik meget i løn for at vente i en lufthavn. Brøken fastsættes efter hvad ventetiden koster i forhold til flyvetiden, alt efter hvordan aflønningen foregår.

fly er den samlede flyvetid af alle flyvninger i den duty. Hvis det er den største af de tre svarer det til at mandskabet kun bliver aflønnet efter flyvetid.

min_guar er den tid hver duty periode minimum koster, altså en slags kompensation oven i flyvetiden hvis en duty er kort. Ofte vil der være et krav til en minimumsarbejdstid eller at mandskabet som minimum bliver betalt for en bestemt antal timer. Uden den ville det ikke være nødvendigt at finde flere mulige duties, andet end en duty per flyvning, for at undgå ventetids omkostningen. Se eksempel nedenfor.



Figur 4.4: DUTY 1, 2 & 3 MELLEM LUFTHAVN A, B & C. Minutterne i de blå felter angiver flyvetiden for de to flyvninger

I figur 4.4 er to flyvninger med tre forslag til duties mellem lufthavn A, B og C. Hvis

det antages at f_d er 0,75, så flyvetid og ventetid ikke er til samme løn, og minimum duty omkostning er 120 minutter. Se tabel 4.1.

Duty	b_d	$f_d * elapse$	fly	min_guar
1	120	45	60	120
2	150	67,5	150	120
3	225	225	210	120

Tabel 4.1: Duty omkostninger: b_d

I denne situation er duty omkostninger: $b_1 = 120$ da min_guar er den højeste værdi, $b_2 = 150$ da flyvetiden er den største værdi og tilsidst $b_3 = 225$ som er $f_d * elapse$.

Da omkostningen af duty 1 og duty 2 til sammen bliver 270 minutter, vil det i dette eksempel være til en lavere omkostning, at dække alle flyvninger med duty 3 i stedet, med kun 225 minutter. Hvis der ikke var nogen minimums duty omkostning, eller andre restriktioner, ville den mindste omkostningen af alle flyvninger i stedet være 210, med 60 og 150 minutter for henholdsvis duty 1 og duty 2. Så ud over at være et minimum antal timer for mandskabet er det også for at fremme sammensætningen af flyvninger, ved at øge omkostningen på duties med få flyvninger. Bemærk, at de forskellige duties også genereres i tilfælde uden en værdi for min_guar .

Duties genereres under de restriktioner mandskabet er underlagt som nævnt ovenfor. Dette gør, at duties kun varer en dag, da der er begrænsninger for, hvor længe mandskabet må arbejde. Et lille flyselskab med kort rækkevide, som kun har flyvninger om dagen vil, som eksempel, have duties spredt mellem 6-22 og kan dermed dele dem op i duties efter dagene. Men større flyselskaber som flyver hen over tidszoner og endda datolinjen, kan have duties uden faste restriktioner for start og slut, så længe de overholder de regler ellers fastsat.

4.4.2 Parring

På samme måde dannes parringen ved at sammensætte duties, som igen skal overholde reglerne for mandskabet. Typiske regler vil være, hvor mange dage i træk mandskabet må arbejde før en hvileperiode, maksimum og minimums tid mellem duties, og et maksimum på hvor længe hver parring må vare. Men der er også yderligere betingelser som skal overholdes, når der dannes parringen. Den forgående dags duty skal ende der hvor næste dags duty starter. Igen, ligesom flyvninger, må duties ikke overlapse.

Typisk vil man have nogle mandskabsbaser, hvor alle parringen starter og slutter. Hvis der kun var én mandskabsbase ville alle parringen skulle starte og slutte der. I det tilfælde ville der blive genereret mange færre parringen end hvis der var to baser.

En af de Europæiske regler ifølge Guo m.fl.[17]: Hviletid i mellem to almindelige duties, mindst 10 timer, mere efter en overtids duty. En parring må højst spænde over 5 dage.

I Barnhart m.fl. [6] nævner de en regel fra FAA (Federal Aviation Administration) i U.S.A., som hedder 8-in-24 regel. Den medfører at, over et hvilket som helst spænd på 24 timer skal inkluderes ekstra hviletid, i tilfældet af at flyvetiden er 8 timer eller derover. Det kan både medføre, at der skal være ekstra hvile mellem duty perioder, hvis de er indenfor samme 24 timer og mellem flyvningerne, hvis de er lange. Denne betingelse skulle især være svær at modellere. Her varer en parring typisk 1-5 dage som er væk fra basen.

En omkostning er også forbundet med parringer, igen opgivet i tid, også fra [6]:

$$c_p = \max \left\{ f_p * TAFB, ndp * mg, \sum_{d \in p} b_d \right\} + \sum_{\substack{\hat{d} \in p, \bar{d} \in p \\ \hat{d} \rightarrow \bar{d}}} e(\hat{d}, \bar{d})$$

Hvor omkostningen c_p af parring p er den ekstra omkostning ved at være væk fra basen plus den længste tid af følgende tre:

En konstant f_p ligesom før, hvor, jo tættere på 1, jo mere er løn i arbejdstid lig løn for ventetiden mellem flyvninger. Dette multipliceres med tid væk fra basen $TAFB$ (Time Away From Base).

Antal duty perioder ndp og en konstant mg som angiver hvor meget en duty minimum koster. Sammen giver det hvor meget hver parring minimum koster.

$\sum_{d \in p} b_d$ som er summen af omkostningen af de duty perioder inkluderet i parringen.

Den ekstra omkostning er sidste led, $\sum_{\substack{\hat{d} \in p, \bar{d} \in p \\ \hat{d} \rightarrow \bar{d}}} e(\hat{d}, \bar{d})$ hvor det er omkostningen af kost

og logi mellem alle duties $\hat{d}$ og $\bar{d}$ i parringen, hvis $\hat{d}$ kommer lige før $\bar{d}$.

Det er ikke et krav, at parringen ikke må inkludere duties som forbindes på basen i midten af perioden. Men ofte vil det gælde at de to andre parrings kombinationer, som dækker præcis samme flyvninger, vil være billigere, da der ikke skal kompenceres for kost og logi som er praksis væk fra basen. Hvis f_p i denne situation også er høj nok til at $TAFB$ er den største værdi vil man med de to parringer i stedet også få en mindre omkostning.

Jo større et flyselskab, jo flere mulige duties og jo flere mulige parringer vil der være og jo større bliver problemet. Det giver også større krav til programmet som skal generere disse, da det, alt andet lige, vil tage længere tid. Som Bernhart m.fl nævner i [6]; et par hundre flyvninger har milliarder af mulige parringer.

4.4.3 Mandskabs parring

Når duties og parringer er genereret, løser man første del af Mandskabsplanlægning, mandskabsparring, som består af at udvælge parringer.

Her minimerer man omkostningen, ved at udvælge den bedste kombination af parringer, som dækker alle flyvninger en gang. Den absolut billigste måde er summen af alle flyvninger, hvor man ignorerer alle regler og restriktioner, og den bruges som nedre grænse. Så objektet er at komme så tæt på den nedre grænse som muligt.

Det gøres generelt for alle mandskabstyper og de tilhørende flyvninger. Igen gælder der restriktioner, som minimum og maksimums flyvninger inden for perioden, ligesom ved generering af duty og parringer. Dette færdiggøres omkring 3 måneder før, hvorimod næste del rostering er senest en måned før.

Mandskabsparring løses med en Set Partitioning SPP eller Set Covering model SCP (henholdsvis [6] og [25]). Diss bliver forklaret nærmere i 4.5 på side 29.

Som Set Partitioning model:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{p \in P} c_p y_p \\ \text{ub} \quad & \sum_{p \in P} a_{ip} y_p = 1 \quad \forall i \in I \\ & y_p \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P \end{aligned} \tag{4.4}$$

Hvor c_p er omkostningen ved parring p , fra mængden P af parringer. y_p er en binær beslutnings variabel som er lig 1 hvis parring p er i løsningen og 0 hvis ikke. Dermed minimeres omkostningerne af de valgte parringer.

a_{ip} er en binær konstant som angiver at flyvning i er i parring p når lig 1 og 0 når den ikke er. Bibetingelse (4.4) gør at alle parringer hvor flyvning i er inkluderet, skal summere til 1, og da y_p er binær er det kun en af variablene som kan blive 1. Det gælder for alle flyvninger i i mængden I . Det medfører at alle flyvninger dækkes præcis en gang.

Som Set Covering ville modellen ændres med $\geq$ i stedet for lighedstegnet i (4.4). Her er det ikke nødvendigt, kun at have hver flyvning dækket en enkelt gang. I praksis betyder det, at flere fra mandskabet bliver tildelt en flyvning og det "overskydende" personale på flyet vil kun blive transporteret. Det kalder man for deadheading og kan også bruges når der mangler mandskab i en lufthavn. Omkostningen ved at have to parringer til at dække en flyvning vil isoleret set være dyrere, end kun at bruge den ene. Deadheading kan dog give muligheden for en bedre samlet løsning. Hvis problemet skal løses som Set Partitioning, altså hvor flyvninger dækkes én gang og kun én gang, skal der være præcis ligeså mange afgangene som ankomster til crew baserne. Ellers vil mandskabet ikke kunne starte og ende i samme base og deadheading vil være nødvendig og det er kun muligt med Set Covering modellen.

Ofte vil man have en bibetingelse med for at sikre arbejdsbyrden fra arbejdsbaserne:

$$\sum_{p \in P} b_{jp} y_p \leq k_j \quad \forall j \in J \tag{4.5}$$

Hvor b_{jp} er en konstant som angiver hvor stor arbejdsbyrden er for parring p med start og slut i base j . Hvis parringen ikke har start og slut i base j vil den være 0. Konstanten k_j angiver den maksimale arbejdsbyrde i base j , fastsat af basen. Da y_p er nul for alle parringer ikke i løsningen, vil det kun gælde for de udvalgte parringer. Så summen af alle udvalgte parringer skal holde sig under en bestemt arbejdsbyrde for hver base.

Bibetingelse (4.5) kan også være et krav om en vis arbejdsbyrde på hver base, så skal ulighedstegnet vendes: $\geq$.

Begge bibetingelser for arbejdsbyrden kan inkluderes og modellen kan udvides med endnu flere bibetingelser, men jo færre bibetingelser jo lettere er problemet at løse.

Som nævnt på side 21 så bliver ovenstående problem typisk løst for hver mandskabsgruppe ad gangen. Hvis der er tre cockpitgrupper, vil der eksempelvis være mindst fire subproblemer som skal løses. Tre cockpitgrupper og en kabinepersonalegruppe. Flere hvis kabinepersonalet også er indelt i grupper som kun varetager bestemte flygrupper. Det reducerer hovedproblemets omfang, da hvert subproblem har færre fly og mindre tilhørende mandskab, som skal optimeres for og det giver færre antal duties og parringer den optimale løsning skal findes fra. Til gengæld er der flere problemer som skal løses. Der er ligeså mange subproblemer som der er mandskabsundergrupper. I nogle tilfælde vil man kun løse to subproblemer, en for cockpit- og en for kabine-personale. Det er blandt andet for at holde cockpitmandskabet sammen under flyvningerne indenfor samme parring og derfor ikke kan splitte problemet op. Se mere i afsnittet om robusthed på side 35.

Resultatet er en udvælgelse af de sammensat mest optimale parringer inden for hver mandskabsundergruppe. Hvor hver flyvning dækkes enten én gang eller mindst én gang for henholdsvis SPP eller SCP, for hver mandskabsgruppe.

4.4.4 Roster

Mandskabs tildeling eller rostering er lidt mere service end minimering af omkostning. Nu er de optimale parringer fundet ud af de mange mulige og mandskabet skal så tildeles udvalgte parringer efter bedst mulig måde, så de alle får et arbejdsskema (Roster i Europa). Et skema er enten 4-6 uger eller en kalender måned ifølge Medard & Sawhney [25]. Ifølge Clausen m.fl. [11] udgives den færdige Roster senest 6 uger før første afgang.

Ifølge [6] bliver mandskab typisk aflønnet med en fast månedlig sats i Europæiske flyselskaber og i Nord Amerika efter hvor meget de er på arbejde, flyver og er væk fra basen. Tidligere har omkostningerne været i tid, men når mandskabet får tildelt en roster bliver det til en omkostning i penge. Hvor stor variation der kan være på den endelige omkostning i Nordamerika, alt efter hvilket personale der bliver matchet med hvilken roster er uvis. Men man må gå ud fra, at det er taget højde for netop dette i fastsættelsen af variablene i planlægningsfasen.

I Nordamerika udføres mandskabs tildeling typisk i to dele ifølge Barnhart m.fl. [6]. Først laves nok skemaer til alle typer mandskab, således at alle parringer er inkluderet

og alle flyvninger er dækket af korrekt mandskab og hvor byrden er jævnt fordelt. Der må ikke være flere skemaer end mandskab i hver gruppe, men gerne færre hvis mandskab kan blive tildelt tomme skemaer. Tomme skemaer vil i så fald blive tilføjet, således, der bliver præcist samme antal skemaer som mandskab. Derefter får mandskabet lov til at byde på skemaerne som derefter bliver tildelt efter buddene.

I Europa bliver rostering optimeret efter ønsker om fri, ferie eller andet. Ifølge Medard & Sawhney [25] har de forskellige personer i mandskabet et mål som forsøges at opnå, i forhold til summen af værdierne forskellige attributter i rosterne får tildelt. Man minimerer derefter de samlede afvigelser af rostertildelingerne, mens man stadig sørger for, at alle mandskabsparringer bliver dækket.

I denne process forsøger man, både i USA og Europa, at fordele arbejdsbyrden over de forskellige skemaer. Rostering bliver løst med Generaliseret Set Partitioning model for hver mandskabstype. Baseret på model fra Barnhart m.fl. [6]

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{m \in M} \sum_{r \in R_m} c_{mr} x_{mr} \\ \text{ubb} \quad & \sum_{r \in R_m} x_{mr} = 1 \quad \forall m \in M \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \sum_{m \in M} \sum_{r \in R_m} f_{rp} x_{mr} &\geq n_p \quad \forall p \in P \\ x_{mr} &\in \{0, 1\} \quad \forall r \in R_m, \forall m \in M \end{aligned} \quad (4.7)$$

Objektfunktionen minimere omkostningen c_{mr} af mandskab m ved skema r , hvor x_{mr} er 1 hvis person m er tildelt roster r og 0 ellers. Der summeres over alle m i mandskabet M og over alle rosters muligt for hver person R_m .

Bibetingelse (4.6) sikrer at kun én roster bliver tildelt hver mand: For hvert medlem af mandskabet gælder, at summen af tildelte rosters skal være 1 og da beslutningsvariabel x_{mr} er binær, vil kun én af variablene være 1.

Hver parring skal have nok mandskab og bibetingelse (4.7) sørger for dette. Variable n_p angiver hvor meget mandskab kræves til parring p . Binære variable f_{rp} er 1 hvis parring p er i roster r og 0 ellers. For hver parring skal gælde, at summen af alle mandskabers tildelte rosters som indeholder paring p er mindst lige så høj som kravet af personale i den paring. Hvis der er brug for 3 af en type mandskab i en bestemt paring p , kræver det at mindst tre fra mandskabet bliver tildelt en roster som indeholder den paring. Der er ikke krav om at alle de udvalgte rosters skal være forskellige. Det kan faktisk være en fordel, og gøre planlægningen mere robust, hvis flere i mandskabet har samme roster, se mere på side 35.

Læg mærke til at omkostningen c_{mr} opbygges således at hver roster r for mandskab m kan være en unik værdi. Men det er ikke en reel omkostning i Europæiske flyselskaber. Man kan sige at man her minimerer generne ved at dække alle parringer.

4.4.5 Overgangsfasen

Problemer er lettest at løse når de er afgrænsede. Men da større flyselskaber flyver dag og nat og måske til mange destinationer i verden, vil flyvninger overlape hinanden. Derfor kan den ikke planlægges for en måned og kun den måned, da der i starten og slutningen af måneden være nogle flyvninger som starter i en måned og slutter i næste. Nogle flyvninger vil dermed høre til den ene og nogle til den anden måned selvom de starter eller slutter i modsatte. Derfor løses også et tredje problem som er overgangsfasen; “transistion problem”, som optimerer overgangen mellem to måneder. I overgangsfasen fanges også problemer som manglende hvile tid eller lignende mellem to måneder. Hvis betingelserne alene opfyldes i hver måned, uden at tage hensyn til dagene op til måneden, er der risiko for at have to parringer er lige efter hinanden, uden den krævede hvileperiode, selvom begge parringer var lovlige, isoleret set, i hver sin måned.

4.4.6 Mandskabs opsamling

Fordi mandskabsplanlægning er sådan et stort problem for lidt større flyselskaber, er det blevet opdelt i mindre problemer. Duty, parring, mandskabsparring og tilsidst roster eller mandskabstildeling. Når hver del optimeres hver for sig, er der risiko for at gå glip af en bedre løsning. En ligeså god anden løsning på eksempelvis mandskabsparringsproblemet, kan muligvis give en endnu bedre løsning i roster. Derfor er der i nyere litteratur flere integrerede modeller, i takt med computationskraften stiger. Guo m.fl. forsøger i [17] at integrere delene i mandskabsplanlægning for at ende med en model. Det er ved, blandt andet i mandskabsparringsfasen, at være opmærksom på mandskabets planlagte aktiviteter som ferie eller træning eller andet som kan forhindre dem i at blive parret.

4.5 Set Partitioning Problem

Set Partitioning er en speciel type heltals lineær programmering. Som navnet angiver er det en model som “partitionerer” problemet op i “mængder” for derved at løse dem.

I mandskabsplanlægning bliver SPP brugt til at udvælge parringer til mandskab på side 26, hvor man også kan bruge Set Covering SCP, og til at tildele en roster til hver person i mandskabet på side 28, som med de mange bibetingelser er et generaliseret Set Partitioning Problem.

I tabel 4.2 vises en oversigt over variationerne af Set - Problemerne.

Navn	Forkortelse	Type	bibetingelse
Set Partitioning	SPP	MIN/MAKS	=
Set Covering	SCP	MIN	$\geq$
Set Packaging		MAKS	$\leq$
Generaliseret Set Partitioning	GSPP	MIN/MAKS	Blanding

Tabel 4.2: SPP familien

Set Partitioning og blandingen kan både være minimering og maksimerings problem. Covering vil altid være et minimeringsproblem. Som maksimeringsproblem ville alle mæng-

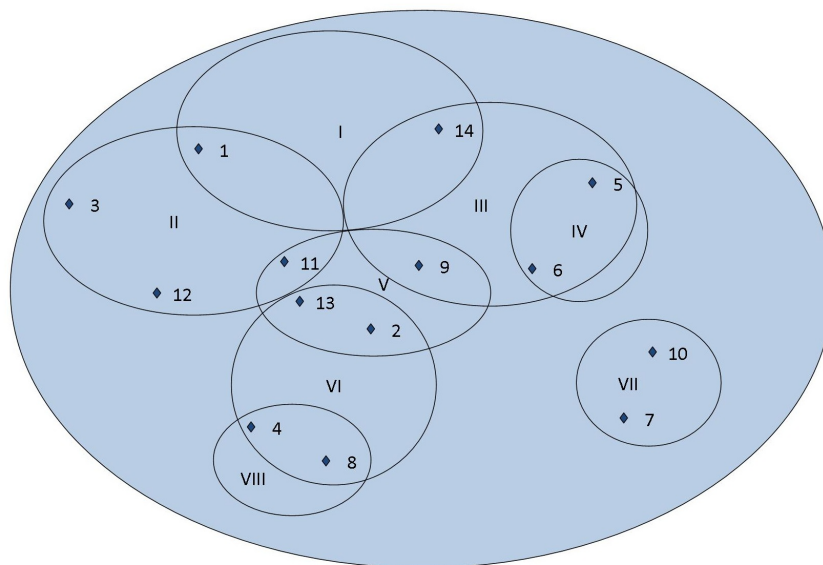
der være i løsningen, da summen af alle giver den højeste samlede værdi. Packaging vil tilsvarende altid være et maksimeringsproblem. Som minimeringsproblem vil ingen mængde være i løsningen, da ingen omkostning må være den absolut mindste. Packaging bliver dog generelt ikke brugt i flyplanlægning.

Ovenstående forudsætter at omkostningerne er positive.

4.5.1 Mængdeopdeling

I Set Partitioning Problemet inddeles muligheder i mængder, som en endelig løsning skal vælges fra.

Se som eksempel figur 4.5. Her ses 14 jobs, det kunne være flyvninger, repræsenteret af ruder. De 8 cirkler markerer hver et sæt, eksempelvis parringer og de flyvninger inkluderet i disse parringer. Alle parringer er med to eller fire flyvninger. Hvis alle flyvninger kun var mellem to lufthavne ville mandskabet således altid starte og slutte i samme base. Der kan laves mange forskellige cirkler om de viste ruder, men de 8 cirkler i figuren er de eneste lovlige sæt i dette eksempel.



Figur 4.5: PARTITIONING MED 14 JOB OG 8 INDELINGER

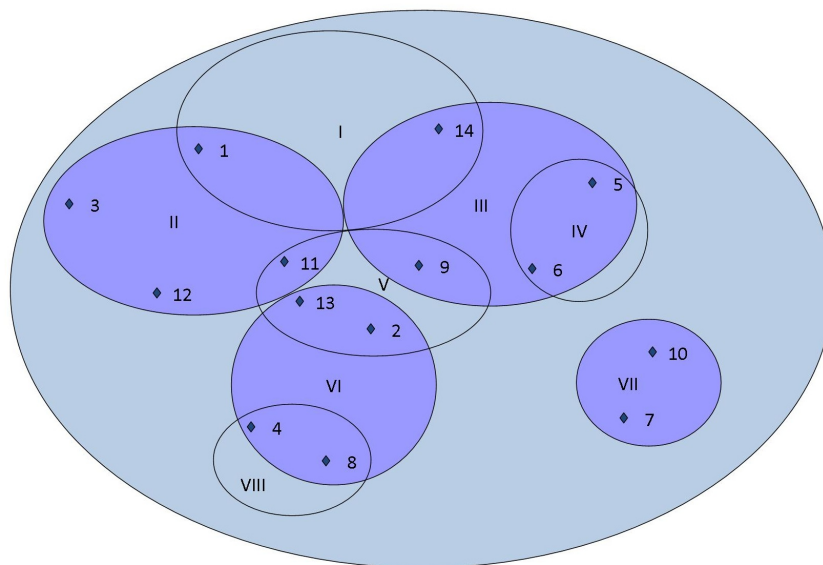
Hvis det var flyvninger, kunne det være regler som maksimal flyvetid, overlap eller andet som gjorde, at ingen andre mængder kunne dannes. Se som eksempel Set VII med flyvning 7 og 10. Det kunne eksempelvis være to meget lange flyvninger, mellem to lufthavne og kan derfor ikke kombineres med andre flyvninger men stadig at ende og starte i samme base.

I dette overskuelige eksempel er der ikke mange mulige mængder at vælge fra.

Som Set Partitioning Problem kunne spørgsmålet være: Hvordan dækkes alle flyvninger kun én gang? I dette tilfælde er der kun en løsning, da andre kombinationer af

mængder, vil føre til dækning af samme flyvning flere gange. Egentlig er det bare udelukkelses metoden.

For at dække flyvning 7 og 10 må Set VII være i løsningen. Flyvning 3 og 12 kan kun dækkes af Set II. Det udelukker brugen af sæt I og V, da henholdsvis flyvning 1 og 11 ville blive dækket to gange. Når Set I ikke må benyttes, kan flyvning 14 kun dækkes af Set III. Ved brug af Set III, udelukkes brugen af Set IV og Set V. Tilbage er flyvning 2, 4, 8 og 13 og kun Set VI kan dække alle fire én gang. Set VIII er derfor også udelukket. Se figur 4.6.



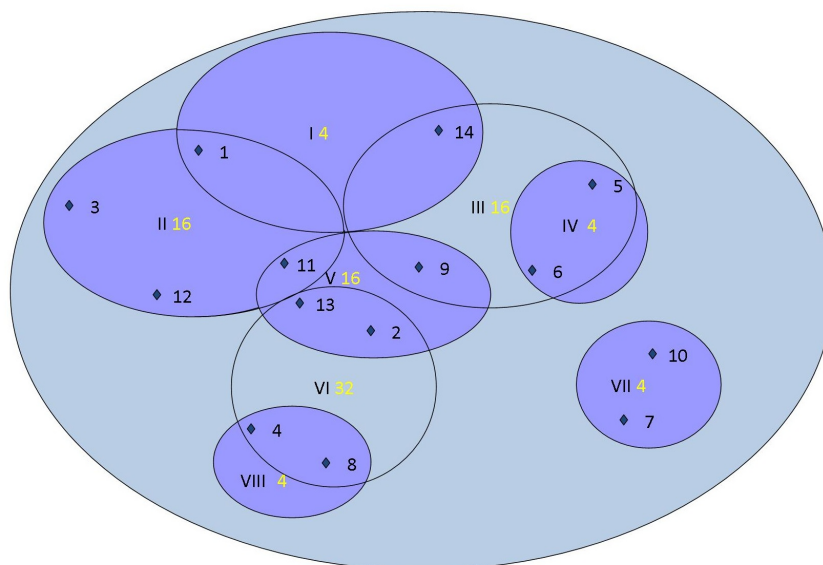
Figur 4.6: PARTITIONING MED 14 JOB OG 8 INDELINGER. De violette er de valgte set i løsningen

Den anden variation brugt i eksempelvis mandskabsparring er Set Covering Problemet, hvor aktiviteterne gerne må dækkes flere gange. Det svarer til at have flere fra mandskabet til at dække flyvningerne. Det er stadig et minimeringsproblem, hvorfor flyvningerne kun dækkes flere gange hvis det er billigere på den måde. En flyvning dækket af to parringar svarer til, at den ene i mandskabet bare fragtes på den flyvning.

Hvor det i ovenstående eksempel med Set Partitioning ikke var nødvendigt med omkostninger, da der kun var en måde at dække alle flyvninger på, er der i dette SCP brug for synlige omkostninger.

Hvis omkostningen pr. aktivitet afhænger af hvor mange jobs der er i mængden, kan omkostningen som eksempel være; to pr. job, hvis der er to i det sæt, og fire per job, hvis fire i det sæt. Dette er et meget simpelt eksempel, hvor udgifterne for hver parring primært afhænger eksponentielt med antal flyvninger og ikke af længden af disse, eller tiden mellem flyvningerne.

Hvis nu Set IV var speciel og de fire aktiviteter sammen havde en dobbelt så høj omkostning, altså en samlet omkostning på 32. Det kunne eksempelvis være overtid, hvis de fire flyvninger sammen tog så lang tid, at mandskabet skulle have overtidsbetaling, for at blive tildelt den mængde.



Figur 4.7: COVERING MED 14 JOB OG 8 INDDELINGER, OMKOSTNING MED GULT De violette er de valgte parringer i løsningen

Se på figur 4.7 hvilken løsning, der ville være bedst. Som før gælder stadig at alle aktiviteter skal dækkes, men som Set Covering må aktiviteter gerne dækkes flere gange. Det ses let at hver enkelt aktivitet, isoleret set, er billigst at dække af en enkelt cirkel ligesom i figur 4.6. Men for at undgå det dyre sæt VI til 32 kan Set V og Set VIII til henholdsvis 16 og 4 vælges i stedet.

Igen er det udelukkelsesprocessen hvor de nødvendige først vælges. Set II og VII er nødvendige, fordi ingen andre mængder kan dække 3, 7, 10 og 12. Af de 6 mængder tilbage, dækker Set $V \cup VIII$ og VI flyvning 2,4,8 og 13. Uanset hvordan resten af sætterne bliver valgt, vil det i dette tilfælde altid være billigere at vælge V og VIII til en omkostning på 20 istedet for VI til 32. Så VI bliver fravalgt. Tilbage er flyvning 5,6 og 14 som mangler at blive dækket. Set $I \cup IV$ til 8 er billigere end Set III som bliver fravalgt.

Hvis man så på Set $I \cup IV \cup V$ og Set III først, ville samme konklusion ikke kunne drages da Set III til 16 vil være billigere end de tre andre til 32. Man ville derfor, kun ud fra dette, vælge Set VI. Men, Set V vælges sammen med Set VII fremfor VI uanset valget af andre mængder. Derfor er det bedst at se på de største omkostninger og mindste forenede sæt først.

Det gør Set I og IV udnødvendig da aktiviteterne er dækket af de tidligere tre. Dermed er kun V, VI og VII tilbage. VI giver 32 og $V + VIII$ giver 20 og dækker til sammen de selvsamme aktiviteter som VI. Derfor er den billigste løsning 56 med aktivitet 2 og 13 dækket to gange.

Sæt:	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	C
SPP omkostning:		16	16		0	32	4	0	68
SCP omkostning:		16	16		16	0	4	4	56

Tabel 4.3: SPP mod SCP

4.5.2 SPP Model

SPP er opbygget med objektfunktionen og den ene bibetingelse som basis, at alle aktiviteter dækkes én og kun én gang.

Modellen fra Mandskabsparring på side 26:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{p \in P} c_p y_p \\ \text{ub} \quad & \sum_{p \in P} a_{ip} y_p = 1 \quad \forall i \in I \\ & y_p \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P \end{aligned} \tag{4.4}$$

Her skal findes den mindste samlede omkostning, ved at udvælge de bedste parringer som i alt dækker alle flyvninger én gang. Variable a_{ip} angiver om flyvning i er i parring p .

Problemet består af flyvninger men løsningen og løsningsmetoden består af parringer. Så enten skal der genereres mulige parringer før modellen skal løses eller løbende mens modellen løses.

I teorien genereres alle de mulige parringer og finder den mest optimale løsning findes ud af alle disse milliarder af parringer. Problemet virker meget let, enten er en parring med i løsningen eller ej. Det er binære ja/nej variable. For hver mulig parring vokser problemet eksponentielt og selv med en hurtig computer, vil en løsning tage enormt lang tid og kan endda tage flere år at løse hvis problemet er stort nok eller regnekraften for lille.

Her er det vigtigt at huske på, at et par hundrede flyvninger kan have milliarder af mulige parringer, fra Barnhart m.fl. [6].

I starten blev forskellig heuristikker primært brugt til at løse problemet. Ifølge Barnhart m.fl. [6] brugte man for omkring 20 år siden en “lokal forbedring” heuristik til at forbedre en given løsning. Samme metode blev også brugt hver gang en ny plan skulle lægges, da der typisk ikke var de store ændringer fra måned til måned. Modellen skulle ikke løses fra bunden hver gang og kun forbedringer skulle findes. Typisk blev dette gjort ved LP-relaxation og branch-and-bound. Mindre mængder af flyvninger og parringer blev pillet ud af løsningen og optimeret og indsat i løsningen igen. Problemet med dette er selvfølgelig, at det kræver mange iterationer og de bedste deløsninger ikke nødvendigvis kan kombineres, til den bedste samlede løsning.

Barnhart m.fl. [6] nævner også en iterations metode i tre trin, som gentages indtil en optimal løsning er fundet. En mere dybdegående forklaring kan findes i Gamache m.fl. [15]

- Trin et: Først løses det begrænsede masterproblem, det oprindelige SPP med kun en lille del af kolonnerne, altså de mulige parringer.
- Trin to: Så løses et prissætnings subproblem, hvor kolonner som kan forbedre løsningen genereres. Typisk ved Shortest Path Problem eller Minimum Cost Network Flow

Problem, hvis der er begrænset kapacitet¹, hvor flyvninger eller duties er forbundet som kanter, i et netværk. Hvis der ikke findes flere kolonner stoppes her.

- Trin tre: De nye kolonner tilføjes det begrænsede master problem og der startes forfra.

Ofte bliver SPP i trin 1 her løst med linear relaxation som ikke nødvendigvis giver heltals løsninger og der bruges så en delvis branch-and-bound metode til at finde heltalsløsningen. Her vil kun ikke-heltalsløsningerne undersøges og med de fundne heltalsløsninger vil trin to begynde.

Clausen m.fl. [11] forklarer det i deres artikel udgivet i 2010. De giver en oversigt over de mest brugte netværks modeller i flyindustrien og hvordan problemerne bygges op af varianter af Set Partitioning modellen.

Hvad angår løsning af Mandskabsparring og Roster, beskriver de hvordan netværket er opbygget af kilde og terminal, som typisk er mandskabsbaserne. Mellem disse er flyvninger eller parringer som noder og de er forbundet af kanter. Ikke alle kanter er nødvendigvis lovlige, så de skal tjekkes i forhold til de gældende regler. Om det er flyvninger eller parringer afhænger af om det er henholdsvis mandsskabsparring eller roster problemet som løses.

Problemet er så enten, at generere alle lovlige parringer eller dynamisk at danne dem, når der er brug for dem. Dynamisk er det ved Shortest Path Problem.

De nævner at der kan være mellem 500.000 til flere milliarder lovlige parringer, alt efter om det er et henholdsvis mindre eller større flyselskab. For de mindre flyselskaber, vil de lovlige parringer typisk blive genereret på forhånd. For større selskaber; som der er brug for dem, ligesom i de tre trin ovenfor.

4.5.3 Shortest Path Problem

Løsnings metoden, til at finde kolonnerne, er eksempelvis Shortest Path Problem i netværket. Her er det de parringer med minimal reduceret omkostning som bliver udvalgt. Alle disse fundne parringer bliver så sat ind i det begrænsede masterproblem som genløses. Så længe der stadig er kolonner med reduceret omkostning fortsættes trin 1-3.

Det duale problem til et standard SPP problem som mandskabsparring side 26 og igen på side 33:

$$\begin{aligned}
 &\text{maks} && \sum_{i \in I} \pi_i \\
 &\text{ubb} && \sum_{i \in I} a_{ip} \pi_i \leq c_p \quad \forall p \in P \\
 &&& \pi_i \in \mathbb{R} \quad \forall i \in I
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Hvor den reducerede omkostning $\bar{c}_p$ af variable y_p udregnes således:

¹Shortest Path Problemet er et særligt tilfælde af Cost Network Flow Problemet hvor der ikke er begrænsninger på kapaciteten på kanterne.

$$\bar{c}_p = c_p - \sum_{i \in I} \pi_i a_{ip}$$

Kolonne med den mindste reducerede omkostning findes ved at løse $\min \bar{c}_p$.

4.6 Robusthed

Robusthed har fået mere fokus i litteraturen og blive kort beskrevet her. Med en robust plan menes, ifølge Burke m.fl. [10], at den er mindre *sensitiv* overfor en forstyrrelse, at den er mere *fleksibel* i den situation og mere *stabil*, således at effekten ikke forplanter sig. Andre værker bruger forskellige mål for robusthed, baseret på observerede svage punkter og forsøger at hæmme dannelsen af de punkter under planlægningen.

Her skelnes mellem rod forsinkelser, som er direkte forårsaget af en begivenhed eller forstyrrelse, og forplantet forsinkelse, som er konsekvensen af den tidligere begivenhed. Et eksempel på rodforsinkelse er, hvis et fly bliver forsinket på en flyvning på grund af en storm, hvis den næste flyvning derfor også bliver forsinket er det en forplantet forsinkelse.

Fokus er mest på at undgå forplantet forsinkelse i planen, da det er noget man kan reducere. For eksempel ved brug af slack og “blive samme”:

Ifølge Clausen m.fl. [11] er slack ofte et valg mellem penge og robusthed. Typisk vil omkostningen øges hvis fly eller mandskab skal være grounded i længere tid mellem hver flyvning. På den måde, kan det ses ligesom en forsikring; jo mere man betaler, jo større forstyrrelser er man, alt andet lige, sikret imod. Analysen af AhmadBeygi m.fl. [4], på flydata fra to store Amerikanske flyselskaber, viser også at mere slack i starten af dagen gavner mest, under forudsætning af en forstyrrelse indtræffer der, i forhold til slack senere på dagen. Men den viser desværre også at slack tidligere på dagen også har en mindre sandsynlighed for at blive brugt.

Slack kan også afhjælpe effekten af en forsinkelse med potentiale til forplantning. Hvis mandskabet på en forsinket flyvning, skal videre til forskellige flyvninger og flyet bruges til en helt anden, kan det forsinke flere andre flyvninger. Med nok slack mellem flyvningerne, sker der ingen forsinkelse, men omkostningen er selvfølgelig også højere som nævnt ovenfor. For at få mere slack kan man, eksempelvis, øge den krævede hviletid mellem flyvninger for mandskab. Hvis forsinkelser typisk kun er i nogle lufthavne eller ruter, kan man nøjes med at tilføje det der. Det kan som eksempel være en lufthavn som Dubai, hvis hyppigste grund til større forstyrrelser er tåge, ifølge Abdi & Sharma [3]. Det er en type forstyrrelse, som ikke er beskrevet nærmere i næste afsnit, men kan være meget forstyrrende hvis hyppigt forekommende. I et sådan tilfælde kan det være en fordel at indsætte ekstra slack i den lufthavn, for at forhindre at eventuelle forstyrrelse i Dubai forplanter sig.

Artiklen af AhmadBeygi m.fl. [4] viser at “fly og cockpitmandskab bliver sammen” giver en stor effekt i forhold til at undgå forsinkelser. Det reducerer netop antallet af forbindelser og slack bliver mindre nødvendigt. Så hvis én flyvning er forsinket, i en plan uden slack, kan det føre til, at flere efterfølgende flyvninger også bliver forsinkede. Netop de efterfølgende flyvninger med; det forsinkede fly, de forsinkede piloter og det forsinkede kabinepersonale. Én forsinket flyvning bliver dermed til yderligere tre forsinkede flyvninger.

Hvis fly, cockpit- og kabine-personale i stedet blev sammen, ville kun den ene efterfølgende flyvning kunne blive forsinket.

Man kan både gøre det mere robust, ved at cockpit mandskabet bliver sammen, cockpit og fly eller alle tre. Hvor robustheden, men typisk også omkostningen, øges som flere er sammen. Kabinepersonalet skulle være den billigste ressource af de tre og der er ofte mere kabinepersonale som back-up og mindre nødvendighed for at de deler roster med cockpitmandskabet.

Rodforsinkelser, er ofte ikke noget man planlægningsmæssigt kan undgå, det er mest de forplantede. Men hvis man gør vedligeholdsruten mere robust, så vil man undgå nogle af forsinkelserne ved eksempelvis akut vedligeholdelse. Som eksempel, kan man planlægge ruterne, så der på ethvert tidspunkt, ofte er et fly ledigt i flere lufthavne, så man let kan udskifte fly. I stedet for at have mange ledige fly i en enkelt lufthavn. Ruterne kan også planlægges i sæt som hver især servicerer to lufthavne og der kun flyves mellem de to. Hvis en flyvning skal aflyses, kan man aflyse begge og undgå konsekvenser i resten af systemet. Det virker som en dyr løsning at aflyse to flyvninger, men man undgår at mandskab og fly vil være strandet et sted eller mangle et andet, til en langt højere omkostning. Ulempen ved denne model er til gengæld passagererne på de to flyvninger. De vil som udgangspunkt blive forstyrrede.

En anden løsning er, at løse planlægningen ved at integrere nogle af modellerne. Den bedste løsning i alle modeller hver især, giver ikke nødvendigvis den bedste samlede løsning på hele det samlede problem ifølge blandt andre Sherali m.fl. [34] og kan endda ende med en uopnåelig løsning. En dyrere løsning kan være bedre at gå videre med til næste del, fordi den kan reducere omkostningerne der.

Weide m.fl. [35] foreslår en integreret model af Rute og Mandskabsparring (ARP & Crew Pairing) som øger robustheden ved at fremme mandskab og fly sammen. Det gør de ved at øge omkostningerne, der hvor kombinationerne ikke er robuste. I tilfældet med mandskabsparring, ville man eksempelvis knytte en ekstra omkostning til, hvis flere forskellige parringer dækker samme flyvning. Her ville en mere robust løsning være, hvis samme crew havde samme flyvninger, altså samme parring. Men den integrerede model er svær at løse, da begge problemer hver især er meget komplicerede.

En anden måde foreslået af Weide m.fl. [35] er at skiftevis løse de to subproblemer og bruge løsningerne som input. Ved test på data, gav det endda en løsning til lavere omkostning, som også var mere robust i forhold til deres definition.

Højere robusthed kan sikre mod nogle forstyrrelser og måske reducere konsekvensen af nogle af de større forstyrrelser. Det vil dog aldrig kunne forhindre større forstyrrelser.

4.7 Opsamling af planlægning

Gennemgangen af planlægningen gav et billede af kompleksiteten. De vigtigste dele i planlægningen, i forhold til genopretningen senere, var planlægningen af fly og mandskab. Flådetildeling var det kritiske her, da flådetypen bestemte hvilket mandskab som skulle bruges på hver flyvning. Her var det begrænsninger som tid, sted og antal fly af hver type,

som var af betydning.

Mandskabsplanlægning, som var i to dele, var også kompliceret da der først skal findes duties og så parringer. I mandskabsparring blev de bedste parringer udvalgt, således at alle flyvninger blev dækket. Rosters tildeles til mandskabet, således at alle parringerne, som dækkede alle flyvningerne, blev dækket.

Her var det begrænsninger som tid, sted og arbejdsregler som var af betydning.

5 Recovery

Målet ved recovery, eller genopretning, er selvfølgelig at komme tilbage til planen bedst muligt. Typisk ved at komme tilbage til planen så hurtigt som muligt, med så få aflysninger og forsinkelser som muligt. Det kan variere hvilken del der prioriteres. Andre steder i litteraturen bliver det også refereret til som Rescheduling eller Operational Scheduling. Normalt er recovery mens planen er i brug. Men fra hver del er løst og op til planen tages i brug, kan der ske ændringer, som skal tages højde for og ændres i den færdige plan. Forskellen er, hvor hurtigt en løsning skal findes. Recovery generelt bliver kort gennemgået nedenfor.

Ifølge Bratu & Barnhart [9] skal en recovery løsning findes indenfor 3 minutter, for at sikre at den ikke bliver uopnåelig.

Den bedste løsning er ikke den med lavest mulige omkostning, men den lavest mulige omkostning, der kan findes inden for kort tid.

5.1 Recovery generelt

Ofte er genopretningen i tre dele ifølge Rosenberger m.fl. [31], først Aircraft Recovery; hvor alle flyvninger igen bliver dækket af ledige fly. Derefter genoprettes Mandskab i Crew Recovery; hvor alle flyvninger dækkes af ledigt personale. Tilsidst findes en løsning for passagerer. Der bliver genoprettet efter ressourcer, da der er færre fly end mandskab. Der ved afhænger genopretningen af Aircraft Recovery. Planlægning er i samme rækkefølge.

Målet er at komme tilbage til den oprindelige plan hurtigst muligt og optimalt uden passager recovery. Eksempler hvor passager recovery ikke er nødvendigt er, hvis et ledigt fly erstatter et med fejl, eller en person fra et stand-by mandskab erstatter en sygemeldt. Begge ændringer er i bedste fald uden forsinkelse af flyvninger.

Der findes flere andre artikler angående recovery, f.eks den af Abdelghany m.fl [1] som gennemgår problemer som kan opstå. Mulige løsningsstrategier, de forskellige omkostninger tilknyttet og en genopretnings model for mandskab.

5.1.1 Recovery muligheder

Fra Rosenberger m.fl. [32] gives følgende recovery hjælpemidler:

- Flyvninger kan forsinkes
- Flyvninger kan aflyses
- Mandskab bliver fragtet, deadhead
- Mandskab bliver fragtet, ferried
- Ekstra fly

- Ekstra mandskab/reservemandskab
- Fly kan byttes, hver får en ny flyvning tildelt
- Mandskabs plan bliver omlagt
- Passagerer bliver omregistreret.

5.1.2 Airline Operations Control Center

Hvis det tager for lang tid at finde en løsning, er der en risiko for at den fundne løsning er uopnåelig. Eksempelvis med Mandskabs Recovery: Allerede fra mandskabet er blevet tildelt, omkring en måned før og hele måneden op til start, bliver rosters justeret i forhold til aflysninger, sygdom, eller andre ændringer og problemer. Her skal en ny løsning findes inden for 15-20 minutter ifølge Medard & Sawhney [25]. Hvis samme problemer opstår, når skemaet er taget i brug, skal en ny løsning findes inden for 1-5 minutter.

At finde en optimal genopretningsplan skal ikke bare gå hurtigt. Planen skal også kunne sættes i værk inden for kort tid.

Ifølge Kohl m.fl. [21] er det tre separate grupper som tager sig af support for fly, mandskab og passagerer. Alle tre grupper er under Airline Operation Control Center AOCC eller nogle gange OCC. Ifølge Abdelghany m.fl. [2] er der en fjerde gruppe, Controllere, som kontrollerer løsningerne fundet af de andre og samler dem til én løsning.

Fra Bratu & Barnhart [9] består AOCC af:

- *Airline operations controllers* controllerne som har det primære ansvar.
- *Crew planners* som sørger for mandskabet.
- *Customer service coordinators* som holder styr på passagerernes rejseplaner.
- *Dispatchers* som holder øje med flyene.
- *Air traffic control group* som holder overblikket over hele systemet.

Den sidste gruppe nævnt ovenfor, er en gruppe som holder styr på informationer fra controllere og de tre andre grupper.

Typisk er det sådan, at hvis controllerne står for at optimere recovery for hele systemet, finder de en løsning, som skal tjekkes med de tre andre grupper. Dialog mellem controllerne og grupperne kan forekomme undervejs, alt efter hvilket problem er opstået. Mindre ændringer og forstyrrelser kan løses af den ansvarlige gruppe og så blive rapporteret til controllerne, som tjekker efter.

Information

Operations Controllers, som tager sig af recovery, skal vide hvor fly, mandskab og passagerer befinder sig på givne tidspunkter. For fly er det typisk, at de skal vide: hvor flyet er på hvilken rute, optaget af eftersyn eller ledig i hvilken lufthavn. For mandskab er det eksempelvis: har de fri, har de tilkaldevagt eller hvor er de i deres duty og hvornår ender

den? Med passagerer er det vigtigt at vide om de er checket-ind i lufthavnen eller om de ombord på et fly.

Samme niveau af information om hvor passagerne præcist er, som ved fly og mandskab, er selvfølgelig ikke altid en mulighed. De lufthavne, som har lukkede gates, hvor passagererne allerede ved gaten viser billet, istedet for ved boarding, har en god mulighed for at reducere antallet af forsinkede passagerer. Når passagererne skal møde, eksempelvis en halv time før afgang, vil personalet allerede inden boarding kunne se, hvilke passagerer der mangler. De manglende passagerer kan så kaldes over højtaler. Det har også den fordel, at passagererne ikke venter i flyet længe før afgang, men med samme fordel som ved tidlig boarding.

Al denne information, om de tre grupper, betegnes samlet i Bratu & Barnhart [9] som *Airline System State* til tid t .

Controllerne har også brug for at vide, eller kunne estimere andre ting, som hvor lang tid det tager; at gå mellem de forskellige gates, flytte et fly til ny gate og lignende. Det er vigtig information i tilfældet af, at der skal laves ændringer i planen. Passagerer eller mandskab må eksempelvis ikke bliver tildelt afgang ved nye gates uden tilstrækkelig tid, til at komme hen til den nye afgang.

5.2 Litteratur - Passager Recovery Problemet

Passager Recovery, PRP, har fået mere opmærksomhed i litteraturen. Nogle modeller forsøger at integrere genopretningen. Andre minimerer omkostningen for passagerer, når en genopretningsplan er fundet for fly og mandskab. Nedenfor vil blive en del af dem opsummeret kort.

5.2.1 PRP løses efter genopretningsplan

Når Kohl m.fl [21] løser PRP, er det med udgangspunkt i allerede funden genopretningsplan baseret på flådetildeling. Deres DPR (Dedicated Passenger Recovery solver) finder den mest optimale ombooking plan, ved at minimere omkostningerne ved et Multi-commodity Flow Problem.

Passagererne er varerne og flyvninger er kanter mellem to noder, start og slut lufthavnen. Hver passager skal så fra en start node til en slut node, ifølge deres rejseplan. Særlige kanter tilføjes for at kunne sætte passagerer af flyet, til en estimeret omkostning af ombooking på andet selskab og tab af goodwill. Kanter tilføjes ved hver lufthavn for forskellige flyvninger, for at muliggøre rejseplaner med flere fly for at komme til destinationen. Omkostningerne på kanterne, er en kombination af hvad det koster at forsinkede passagererne eksempelvis i kost og logi, tab af goodwill og omkostning, ved at opgrade eller compensation ved downgrade af flybillet.

Her bliver der genoprettet af mindst to omgange, hvor beslutningen dermed ikke bliver taget på baggrund af alle omkostningerne. I stedet minimeres omkostning hver for sig.

Modellen var dog stadig en forbedring fra den manuelle metode. Customer Service Recovery Manageren brugte i gennemsnit 45 minutter på at finde en løsning imod 1-10 sekunder for DPR modellen. I de tilfælde med mindre forstyrrelser var de to løsninger

ens, men ved de større forstyrrelser, som per definition dermed også er mere komplicerede at løse, var DPR løsningen bedre og gav også et mere præcist billede af omkostningen.

Eggenberg m.fl. [13] løser igen først flyproblemet og bruger derefter løsningen til at løse PRP som et RCSPP (Ressource Constrained Shortest Path Problem). Objektet er; at minimere omkostningerne af forsinkelse og aflysning. Et loft sættes på hvor stor forsinkelsen må være og hvor mange flyvninger hver passager må foretage. Ved test af modellen blev den maksimale forsinkelsestid sat til 800 (13 timer og 20 minutter). Ligesom i [21] er der indsat kanter for aflysninger af rejseplan. To betingelser skal opfyldes: Der må ikke bookes flere passagerer på et fly, end der er kapacitet til. Alle passagerer skal have en ny rejseplan. Den nye rejseplan kan også bestå af en aflysning som betyder at passagererne ombookes på et andet flyselskab.

I testfasen sammenligner de deres model med FlowPRP, som kort sagt kun løser problemer for de passagerer, som er blevet forstyrret i en MCNF (Minimum Cost Network Flow) model. Deres PRP model var bedre end FlowPRP i de fleste af otte tilfælde, hvad angår aflyste passagerer og omkostninger ved genopretning. Men modellen brugte til gengæld også meget længere tid, i gennemsnit 3.102 sekunder imod 1,0. Det svarer til knap en time, hvilket er for lang tid ved typiske forsinkelser. I alle tilfældene er der væsentlig flere passagerer, som får en ny rejseplan og det er heller ikke så hensigtsmæssigt ved så lang udregnings tid. Derved er en riskiko for, at passagerer ikke bliver informeret i tide og dermed kommer for sent til de nye flyvninger, hvilket fører til endnu flere forsinkelser, som skal udregnes.

5.2.2 Integreret model

Ifølge Filar m.fl. [14] forsøger L. Lettovsky i sin Ph. D afhandling fra 1997, at løse alle tre problemer samlet. Ved først at løse masterproblemet med forstyrrelsen og derefter bruge input fra tre løste subproblemer; mandskab, fly og passager. Iterationerne fortsætter med masterproblem og derefter subproblem, indtil en løsning findes.

I Rosenberger m.fl. [31] angiver en omkostning på hver "trip" for passagerer og crew og minimerer omkostningen af alle "trip". Derved minimeres forstyrrelserne for passagererne og crew. Modellen tager ikke højde for recovery af crew eller passagerer, der minimeres blot omkostninger for forstyrrelsen. En "trip" er en passagers rejseplan eller et mandskabs arbejdsplan. Modellen forsøger at minimere forstyrrelser, for at reducere forstyrren af mandskab og passagerer. Modellen mangler en kobling mellem forsinkelse og passagerer. To forskellige løsninger, som begge minimerer den samlede forstyrrelse, kan være til to vidt forskellige passageromkostninger.

Modellen af Jafari & Zegordi er baseret på en model med kombineret fly og mandskabs recovery og modellen af Bratu & Barnhart som bruges senere. Den store forskel er, at passager- og fly-genopretning bliver med passagerrejseplaner og flyrotation istedet for flyvninger. Modellen blev testet på et mindre datasæt, knap 1/10 af flyvningerne i Bratu & Barnhart uden angivelse af løsnings tiden.

5.3 DPM Disrupted Passenger Metric model:

De to modeller af Bratu & Barnhart i [9] er baseret på fleet assignment, fordi man dermed kan holde flybalancerne. Flybalancen og start og slut kapacitetet er næsten ligesom i FAM på side 20. DPM er den eneste af de to, som kan løses på kort tid og derfor kan bruges i genopretnings situationer.

Følgende muligheder bruges for at genoprette planen:

1. Ekstra mandskab/fly og fly rotation.
2. Aflysning af flyvning og udskydelse af afgang

Hvoraf det antages at mellem 25-30% ekstra mandskab står til rådighed for flyselskabet.

Omkostningen for forstyrrede passagerer per rejseplan er kun et estimat. Hvis passagererne ombookes på en rejseplan, som kun gør dem nogle timer forsinket, vil omkostningen ikke være så høj. Hvis de skal overnatte i en lufthavn, er omkostningen højere da det inkluderer logi.

For at reducere antallet af forstyrrede passagerer, kan omkostningen sættes til meget høje værdier. Men hvis de sættes for højt, vil det eksempelvis altid være billigere at udsætte flyvningerne til langt ud på natten, således at flere passagerer når deres tilslutning. Det vil dog føre til langt højere omkostninger i overarbejde og reservemandskab end der reelt er sparet, ved at undgå forstyrrede passagerer. Derfor skal de sættes til et realistisk niveau for hver rejseplan, for give en bedre løsning ved recovery i forhold til faktiske omkostninger.

Passagerer på samme flyvninger kan differentieres i forhold til billetkategorien. Flere rejseplaner, kan så indeholde samme flyvninger, men hvor passagereromkostningen ved forstyrrelse og forsinkelse er anderledes..

En estimation af tabt salg/loss of goodwill kan også inkluderes i forstyrrede passagerer. Uanset om de bliver genbooket med det samme eller først kommer til destinationen dagen efter, kan en forstyrret rejseplan føre til utilfredshed og mistede kunder. Dette estimat kunne også være forskelligt for rejseplaner med samme flyvninger.

Modellen er som udgangspunkt med højst to flyvninger per passagerrejseplan, men kan udvides til flere hvis nødvendigt.

Modellerne er uden mandskabsrecovery. Reservemandskab kan indsættes og omkostningen ved dette skal inkludere eventuelle omkostninger til at genplacere det oprindelige mandskab.

Vedligehold for fly er heller ikke inkluderet i modellen. Men Barnhart & Bratu forsøger at placere fly, som trænger til vedligehold eller eftersyn, i lufthavne med service stationer. Da fly kan risikere at blive grounded, hvis de ikke får eftersyn, er det et vigtigt element at have med. I stedet for at inkludere det i modellen, tjekkes løsningen for, om de aktuelle fly er placeret ved en service lufthavn. Hvis ikke indsættes bibetingelser som gør at det/de

fly bliver omdirigeret og modellen løses igen. Denne process fortsættes indtil flyene er placeret korrekt.

Modellen minimerer driftsomkostninger, hvor det vigtigste element er passageromkostninger ved forsinkelse og forstyrrelse. Derved synliggøres konsekvenserne bedre ved eksempelvis aflysning og forsinkelse af flyvninger. To lige gode løsninger, kun i forhold til fly, kan være med to meget forskellige passageromkostninger.

Den sidste model PDM, Passenger Delay Metric, ombooker forstyrrede passagerer på nye rejseplaner. Omkostningen, bliver fastsat ud fra kombinationen af oprindelig og endelig rejseplan. Da den gennemsnitlige løsningstid er på 84 minutter, bruger den for lang tid.

5.3.1 Model

Bratu & Barnhart DPM model er som følger:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{r \in R} c_r * n_r * \lambda_r + \sum_{i \in I} \sum_{t \in H(i)} \left(o_i^t + (n_i - \sum_{r \in R} n_r \beta_i^r \lambda_r) * d_i^t \right) * x_i^t \\ & + \sum_{m \in M} \sum_{v=1, \dots, n_m} e_v^m * (r_v^m + q_v^m) \end{aligned}$$

Objektfunktionen består af tre led. Det første, er omkostningen af forstyrrede passagerer. Det andet, er omkostningen af forsinkelse af ikke-forstyrrede passagerer, fly og mandskab. Det sidste, er omkostningen af reservemandskab.

Første led: $\sum_{r \in R} c_r * n_r * \lambda_r$ er den samlede omkostning af forstyrrede rejseplaner.

c_r er den estimerede omkostning per passager når rejseplan r er forstyrret.

n_r er antallet af personer på rejseplanen.

$\lambda_r = 1$ når rejseplan r er forstyrret. En passagers rejseplan er forstyrret enten, hvis en forsinkelse har gjort at et tilslutningsfly ikke blev nået, eller et fly i den planlagte rejseplan, er aflyst.

Sammen giver de tre forstyrrelsesomkostningen for rejseplan r . Når $\lambda_r = 0$, er rejseplan r ikke forstyrret og forstyrrelses omkostningen er 0.

Summen over alle rejseplaner, giver den totale forstyrrelses omkostning.

Det næste er forsinkelses ledet: $\sum_{i \in I} \sum_{t \in H(i)} \left(o_i^t + (n_i - \sum_{r \in R} n_r \beta_i^r \lambda_r) * d_i^t \right) * x_i^t$

Det er forsinkelses omkostningen ved ikke-forstyrrede passagerer og fly/ mandskab.

o_i^t er omkostningen af fly og mandskab ved forsinkelse.

d_i^t er omkostningen per ikke-forstyrret passager ved forsinkelse.

Begge omkostninger afhænger af flyvningen i og kopien t af denne. En afgang forsinket med 15 minutter, kan være uden ekstra omkostning hvis det skønnes, at det kan indhentes, som eksempelvis på en 8 timers flyvning. Den kopi t af flyvning i , som er den oprindelige afgang, er altid uden omkostning ved forsinkelse, da den per definition ikke er forsinket.

Da d_i^t kan være forskellig for hver flyvning, er det vigtigt at vide antallet af ikke-forstyrrede per flyvning.

De ikke forstyrrede-passagerer på hver flyvning er: $(n_i - \sum_{r \in R} n_r \beta_i^r \lambda_r)$

n_i er antallet af personer med i som sidste flyvning. For hver flyvning i , skal antallet af forstyrrede passagerer trækkes fra. Antallet af passagerer på rejseplan r som er forstyrrede, er igen $n_r * \lambda_r$. Men for hver flyvning i , er det kun de forstyrrede passagerer på rejseplan r , som har i som sidste flyvning der skal trækkes fra. Variabel β_i^r er derfor nødvendig, til at angive når passagererne på rejseplan r har i som den sidste flyvning. Hvis i ikke er sidste flyvning er $\beta_i^r = 0$. Antallet af passagerer med forstyrret rejseplan r , skal så ikke trækkes fra denne flyvning. Summen af alle forstyrrede passagerer, med flyvning i som den sidste, skal trækkes fra det samlede antal passagerer med sidste flyvning i . Det giver det samlede antal ikke-forstyrrede passagerer på flyvning i .

x_i^t angiver hvilken af kopierne t af flyvning i der benyttes, hvis nogen. Når $x_i^t = 1$ er det t 'te kopi af flyvning i som benyttes. Når lig 0 benyttes den afgangsmulighed ikke.

Der gælder at $\sum_{i \in I} x_i^t \leq 1 \forall t \in H(i)$, da flyvning i ikke vil afgå flere gange. Højest på et tidspunkt, som er en af kopierne, af flyafgangene i sættet $H(i)$.

Samlet, summeres omkostningerne ved forsinkelse for mandskab, fly og ikke-forstyrrede passagerer over de t kopier af flyvning i .

I alt giver det andet led, med summen over alle kopier og alle flyvninger, den samlede forsinkelses omkostning af ikke-forstyrrede passagerer og fly/mandskab.

Det tredje led er: $\sum_{m \in M} \sum_{v=1, \dots, n_m} e_v^m * (r_v^m + q_v^m)$

e_v^m er omkostningen ved at indkalde et reservemandskab til at betjene den v 'te flyvning i mandskab m plan. Alle e_1^m sættes højt for at undgå, at indsætte reservemandskab allerede ved første flyvning. Omkostningen er udover til reservemandskabet, også en estimation af omkostningen ved at genplacere det strandede mandskab.

$r_v^m = 1$, hvis et reserve mandskab skal betjene v 'te flyvning i mandskab m 's plan, på grund af aflysning.

$q_v^m = 1$, hvis et reserve mandskab skal betjene v 'te flyvning i mandskab m 's plan.

Så det sidste led, giver de totale omkostninger, ved at indsætte reservemandskab, og genplacere det oprindelige mandskab, på de nødvendige flyvninger.

Objektfunktionen er dermed den totale forstyrrelses-omkostning for passagerer plus den totale forsinkelses-omkostning for mandskab/fly og ikke-forstyrrede passagerer og omkostningen ved nødvendigt reservemandskab.

5.3.2 Bibetingelser

De nødvendige bibetingelser er som følger:

$$\sum_{(i,t) \in I_{n-}^{k,a}} x_i^t + y_{n-}^{k,a} - \sum_{(i,t) \in I_{n+}^{k,a}} x_i^t - y_{n+}^{k,a} = 0 \quad \forall k \in K, \forall a \in A, \quad \forall n \in N(k, a) \quad (5.1)$$

$$\sum_{(i,t) \in I_{b+}^{k,a}} x_i^t + y_{b+}^{k,a} = N_b^{k,a} \quad \forall k \in K, \forall a \in A \quad (5.2)$$

$$\sum_{(i,t) \in I_{e-}^{k,a}} x_i^t + y_{e-}^{k,a} = N_e^{k,a} \quad \forall k \in K, \forall a \in A \quad (5.3)$$

$$\sum_{t \in H(i)} x_i^t + z_i = 1 \quad \forall i \in I \quad (5.4)$$

$$x_{HT(r,1)}^t + \sum_{u \in VC(HT(r,1),t)} x_{HT(r,2)}^u - \lambda_r \leq 1 \quad \forall r \in C \quad \forall t \in H(HT(r,1)) \quad (5.5)$$

$$\lambda_r \geq z_i \quad \forall r \in R, \forall i \in HT(r) \quad (5.6)$$

$$x_{i_m(v)}^t + \sum_{j \in V(m,v,t)} x_{i_m(v)}^j - q_{v+1}^m \leq 1 \quad \forall m \in M, \forall v = 1, \dots, n_m - 1, \quad \forall t \in H(i_m(v)) \quad (5.7)$$

$$\sum_{v=1, \dots, j} \sum_{t \in H(i_m(v))} \left(x_{i_m(v)}^t \gamma_{a1_m(v)}^{a1_m(j)} - x_{i_m(v)}^t \gamma_{a2_m(v)}^{a1_m(j)} \right) - \sum_{v=1, \dots, j} r_v^m \gamma_{a1_m(v)}^{a1_m(j)} \leq 0 \quad \forall m \in M, \quad \forall j = 2, \dots, n_m \quad (5.8)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{v=1, \dots, n_m} (r_v^m + q_v^m) \gamma_{a1_m(v)}^a \delta_m^k \leq E(a, k) \quad \forall a \in A', \forall k \in K \quad (5.9)$$

Bibetingelse (5.1) sørger for at flybalancen stemmer. Det gælder for alle flytyper k , lufthavne a og noder n .

$$\sum_{(i,t) \in I_{n-}^{k,a}} x_i^t + y_{n-}^{k,a} - \sum_{(i,t) \in I_{n+}^{k,a}} x_i^t - y_{n+}^{k,a} = 0$$

x_i^t angiver igen hvilken kopi t af flyvning i der benyttes. Lig 1 når kopi t af flyvning i afgår og 0 ellers.

$I_{n-}^{k,a}$ er mængden af flyvninger, som ankommer i node n , af flådetype k i lufthavn a , hvor $I_{n+}^{k,a}$ er mængden som afgår.

$y_{n-}^{k,a}$ er antallet af fly af type k , i lufthavn a , på “jorden” fra sidste node til n . Og tilsvarende er $y_{n+}^{k,a}$ antallet af fly af type k , i lufthavn a , på “jorden” til næste node fra n .

Modellen er indrettet således, at der mellem hver node i lufthavnen er en “jord”kant. Værdien af den angiver hvor mange fly, der står stand-by mellem hver node. Så for hver node, er der et vis antal fly lige før node og et vis antal fly lige efter node. De er ens, hvis ingen eller samme antal fly ankommer i og afgår fra den node. “Jord”kanten mellem to noder, vil altid have samme antal fly afgående fra første node og indgående til anden node. Hvis de var forskellige, ville der forsvinde eller opstå fly.

Bibetingelsen betyder så, at summen af alle ankomne flyvninger plus antallet af stand-by fly lige før node n , skal være lig summen af alle afgående flyvninger, plus stand-by fly lige efter node n . Det skal gælde for alle lufthavne og flådetyper.

Bibetingelse (5.2) og (5.3) er flytype balancerne i alle lufthavne for starten og slutningen af genopretningsperioden. Igen gælder:

$x_i^t = 1$ angiver, at kopi t af flyvning i afgår og er lig 0 ellers.

Bibetingelse (5.2) er for starten af perioden. Det gælder for alle flytyper k og lufthavne a .

$I_{b+}^{k,a}$ er mængden som afgår fra begyndelses node b .

$y_{b+}^{k,a}$ er antallet af fly af type k i lufthavn a på “jorden” som føres ind i recovery perioden fra begyndelses node b .

$N_b^{k,a}$ er antallet af operationelle fly af typen k i lufthavn a til tiden b , hvor recovery perioden starter.

Summen af alle afgående fly på tidspunktet af begyndelses noder plus beslutningsvariablen $y_{b+}^{k,a}$ skal være lig antallet af operationelle fly. Det fastsætter også antallet af fly på den først “jord”kant til næste node.

Bibetingelse (5.3) er for slutningen af perioden. Det gælder for alle flytyper k og lufthavne a .

$I_{e-}^{k,a}$ er mængden af flyvninger som ankommer i slutnode e , af flådetype k , i lufthavn a . Og tilsvarende er $y_{e-}^{k,a}$ antallet af fly af type k , i lufthavn a , på “jorden” som tages med fra recoveryperioden til slutnode e .

$N_e^{k,a}$ er antallet af operationelle fly af typen k , som skal ende i lufthavn a til tiden e , hvor recovery perioden slutter.

Bibetingelsen sørger for at alle ankomne fly til tidspunktet for slutnode plus antallet af fly på “jord”kanten er lig antallet af operationelle fly.

I FAM på side 20 blev flybalancen suppleret med bibetingelse 4.3. Den sørgede for, at det samlede antal af fly, af hver flådetype, højst var lig antallet til rådighed. Det skulle

gælde for et vilkårligt tidspunkt, da flybalancen sørger for at denne begrænsning bliver holdt resten af tiden.

Her er denne bibetingelse ikke nødvendig, da de to bibetingelser til start og slut af recoveryperioden, fastsætter antallet af flyvninger.

$$\sum_{a \in A} N_b^{k,a} = \sum_{a \in A} N_e^{k,a} \text{ for alle flådetyper.}$$

Bibetingelse (5.4) sørger for at hver flyvning i enten har en afgang, eller er aflyst. x_i^t angiver igen hvilken kopi t af flyvning i , der benyttes og summen over alle t lig 1 betyder, at flyvning i afgår.

Variablen $z_i = 1$ når flyvning i er aflyst og 0 ellers.

Dermed giver det, at summen af alle kopier af flyvning i eller z_i skal give en, for hver flyvning. Altså, enten aflyses eller gennemføres.

De næste to bibetingelser angiver om en rejseplan er forstyrret.

Bibetingelse (5.5) sikrer, at en rejseplan angives som forstyrret, hvis der ikke er tid nok mellem flyvningerne. For alle tilslutnings rejseplaner $r \in C$ og alle kopier t af første flyvning i hver rejseplan. Da modellen er bygget op af højst to flyvninger i hver rejseplan, er C mængden af alle rejseplaner med to flyvninger.

$$x_{HT(r,1)}^t + \sum_{j \in VC(HT(r,1),t)} x_{HT(r,2)}^j - \lambda_r \leq 1$$

Den første beslutningsvariabel $x_{HT(r,1)}^t$ angiver, at kopi t af første flyvning $HT(r,1)$ i rejseplan r , er valgt til at afgå når lig 1 og er 0 når ikke valgt.

Når $x_{HT(r,2)}^j = 1$ angiver det, at den anden flyvning $HT(r,2)$ i rejseplan r , er valgt til at afgå til tidspunktet af kopi j af flyvningen og 0 ellers. Her er j af mængden $VC(HT(r,1),t)$, som er alle de potentielle næste flyvningers kopier, som passagererne på første flyvning $HT(r,1)$'s t 'te kopi, ikke kan nå.

Den sidste beslutningsvariabel λ_r , er lig 1, når rejseplanen er forstyrret.

Hvis de første to beslutningsvariabler er 1, skal λ_r også vælges til 1, for at venstre side bliver mindre eller lig 1. Hvis kun den ene, er lig 1, er værdien af den sidste udedkommen i denne bibetingelse. Det betyder, at det kun er når *begge* er valgt, at rejseplanen *skal* være angivet som forstyrret i denne bibetingelse. Endvidere gælder der, at hvis rejseplanen er forstyrret, er valget af de første to beslutningsvariabler irrelevante.

Ideen med denne bibetingelse er, at sikre at en rejseplan bliver angivet som forstyrret, hvis der ikke er tilstrækkelig tid fra første flyvning, til tilslutningsflyet. Så for hver valgte afgang af en flyvning, skal rejseplanen angives som forstyrret, hvis der gælder, at næste flyvning er uopnåelig fra første flyvning. For at vide om afgang er uden utilstrækkelig tid, til næste tilslutning, bruges mængden $VC(i,t)$. Det er samlingen af alle afgangene uden nok tilslutningstid, til at nå fra flyvning i 's kopi t .

For hver flyvning kommer det an på hvilket afgangspunkt der vælges. Derfor er der en forskellig mængde for hver kopi t . Summen i bibetingelsen, bliver dermed brugt til at gennemløbe alle utilstrækkelige forbindelses afgangene, for hver kopi, af hver flyvning. Hvis anden flyvning ikke vælges til at afgå, på et af disse tidspunkter, er rejseplan ikke forstyrret

på grund af manglende tilslutningstid. Rejseplanen kan dog stadig være forstyrret, hvilket gør det nødvendigt med næste bibetingelse.

Så, for hver første flyvning, hvor $x_{HT(r,1)}^t = 1$ skal gælde, at hvis næste flyvning $x_{HT(r,2)}^j = 1$, hvor j er i mængden af kopier af uopnåelige tilslutninger, skal rejseplanen være forstyrret $\lambda_r = 1$.

Bibetingelse (5.6) sikrer, at en rejseplan er forstyrret, hvis en flyvning i denne er aflyst. For alle rejseplaner r og de flyvninger i rejseplanen.

Så for hver rejseplan r 's flyvninger gælder, at hvis en flyvning i aflyses, $z_i = 1$, så skal rejseplanen være forstyrret, altså $\lambda_r = 1$. Det gælder for alle rejseplaner. En rejseplan kan godt være forstyrret, uden en flyvning i denne rejseplan er aflyst, eksempelvis i tilfældet med utilstrækkelig tilslutningstid som ovenfor.

Bibetingelse (5.7) sikrer, at et reservemandskab indsættes til næste flyvning, hvis det planlagte mandskab ikke kan nå denne, eller ved at nå denne, bryder arbejdsregler. Det skal gælde for hvert medlem af mandskabet og for hver af deres respektive flyvninger, på nær den sidste. Per definition er der ingen flyvninger efter den sidste.

$$x_{i_m(v)}^t + \sum_{j \in V(m,v,t)} x_{i_m(v+1)}^j - q_{v+1}^m \leq 1$$

$x_{i_m(v)}^t$ angiver, at t 'te kopi, af mandskabets v 'te flyvning afgår når lig et. $V(m,v,t)$ er mængden af kopier, af mandskab m 's næste flyvning $v+1$, enten uden tilstrækkelig transittid fra v 'te flyvning eller hvor forsinkelsen gør, at arbejdsregler bliver overtrådt. Så for hver person i mandskabet, flyvning og kopi t , er det kopier af næste flyvning som ikke kan gennemføres.

Hvis $x_{i_m(v+1)}^j = 1$ og j er i V , betyder det at mandskab m på kopi t af flyvning v ikke kan betjene flyvning $v+1$

q_{v+1}^m er en variabel som angiver, om et reservemandskab skal indsættes i stedet for mandskab m . Hvis den er lig 1, betyder det, at flyvningen $v+1$ i mandskab m 's duty, skal varetages af afløsere.

Hvis begge førstnævnte variable er 1, skal sidstnævnte q_{v+1}^m også være lig 1. Med andre ord, et reservemandskab skal indsættes på næste flyvning. Denne bibetingelse er ligesom (5.5), da det kun er når de to første variable begge er lig 1.

Så for hver valgte afgang af en flyvning, skal der, indsættes et reserve mandskab på næste flyvning, hvis afgang vælges til at afgå på et tidspunkt, som er uopnåeligt for mandskabet.

Bibetingelse (5.8) sørger for at der tildes et reserve mandskab i tilfælde hvor en flyvning er aflyst. Bibetingelsen gælder for alle i mandskabet, fra flyvning 2 og til den sidste i dennes duty. Det gælder først fra den anden flyvning, da alle flyvninger skal tjekkes i forhold til den forgående i dutien. Per definition har første flyvning ingen

tidligere flyvninger.

$$\sum_{v=1,\dots,j} \sum_{t \in H(i_m(v))} \left(x_{i_m(v)}^t \gamma_{a1_m(v)}^{a1_m(j)} - x_{i_m(v)}^t \gamma_{a2_m(v)}^{a1_m(j)} \right) - \sum_{v=1,\dots,j} r_v^m \gamma_{a1_m(v)}^{a1_m(j)} \leq 0$$

$x_{i_m(v)}^t$ er igen beslutningen om flyvning v i mandskab m 's plan gennemføres på kopi t af flyvning i . Den er lig 1 når den gennemføres og lig 0 ellers.

$\gamma_{a1_m(v)}^{a1_m(j)} = 1$, når flyvning v , i mandskab m 's plan afgår fra lufthavnen hvor flyvning j af mandskab m 's flyvning afgår.

$\gamma_{a2_m(v)}^{a1_m(j)} = 1$, når flyvning v i mandskab m 's plan ankommer i lufthavnen hvor flyvning j af mandskab m 's flyvning afgår.

$r_v^m = 1$ hvis mandskab m 's planlagte flyvning v skal dækkes af et reservemandskab.

Der summeres over alle flyvninger, fra den første op til den der tjekkes i bibetingelsen, og for alle kopier af t .

For $j = 2$ vil summen være for $v = 1, \dots, 2$. Bibetingelsen vi dermed se således ud:

$$\begin{array}{c} \overbrace{\quad \quad \quad}^{v=1} \\ x_{i_m(1)}^t \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(2)} \quad - x_{i_m(1)}^t \gamma_{a2_m(1)}^{a1_m(2)} \quad - r_1^m \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(2)} \quad + \\ \underbrace{\quad \quad \quad}_{v=2} \\ x_{i_m(2)}^t \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(2)} \quad - x_{i_m(2)}^t \gamma_{a2_m(2)}^{a1_m(2)} \quad - r_2^m \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(2)} \quad \leq 0 \end{array}$$

Der bliver hurtigt mange led i bibetingelsen. Når $j = 4$ er der 12 led, men mange er af værdien 0. γ variablene vil ofte være lig 0, så kun tilfældene lig 1 er relevante. Se eventuelt bilag 3 på side 86 for bibetingelsen med større j .

$\gamma_{a1_m(v)}^{a1_m(j)} = 1$, når $v = j$ i hver sum over j . Lufthavnen som flyvning 2 letter fra, vil altid være den lufthavn flyvning 2 letter fra.

$\gamma_{a2_m(v)}^{a1_m(j)} = 1$, når $v = j - 1$ i hver sum over j . I mandskab m 's plan vil næste planlagte flyvning afgå fra lufthavnen hvor den sidste er ankommet.

Hvis en flyvning j i mandskab m 's plan gennemføres, så skal flyvning $j - 1$ også være betjent af mandskab m eller et reservemandskab indsættes på flyvning j . Det gælder for anden til sidste flyvning og for alle i mandskabet.

Ved flyvninger imellem de samme lufthavne, som ved parvise flyvninger, opstår et problem. Bibetingelsen vil tælle afgang og ankomster fra samme lufthavn og kræve en indsættelse af reservemandskab, når der ankommer færre end der afgår.

Hver gang flyvninger fra samme lufthavn, som første flyvning, tjekkes i bibetingelsen kan et reservemandskab dermed blive nødvendigt. Hvis første og denne flyvning afgår, og kun sidste flyvning er ankommet, mangler der mandskab ifølge balancen. Se eventuelt bilag 4 på side 87 for længere udredning.

For parvise ture gælder:

$\gamma_{a1_m(v)}^{a1_m(j)} = 1$ når $v = j - 2$ for $j = 3$ og da tredje flyvning afgår fra samme lufthavn som første flyvning.

$\gamma_{a2_m(v)}^{a1_m(j)} = 1$ når $v = j - 3$ og $j = 4$, da tredje flyvning vil ankomme i den lufthavn fjerde flyvning flyvning afgår fra.

Problemet opstår fordi, for hver næste flyvning skal der ankomme mindst ligeså mange tidligere flyvninger til lufthavnen, som der afgår, ellers indsættes reservemandskab.

Flybalancen fra tidligere sørger for at overholde balancen for flyene og denne bibetingelse søger for, at mandskabet også er klar til næste flyvning. Men der mangler informationen om, at mandskabet står klar i første lufthavn. Det er også derfor bibetingelsen først gælder fra anden flyvning, fordi der tjekkes om den forgående ankommer i lufthavnen den næste afgår fra. Essentielt mangler der en jordkant, som angiver at et mandskab er klar i første lufthavn.

Den mest simple måde er, at tilføjes $-\gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(j)}$ til bibetingelsen. $\gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(j)} = 1$ når flyvning j afgår fra den første lufthavn.

Hvis duties består af samme lufthavne, er denne tilføjelse ikke nødvendig og alle $-\gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(j)}$ er også lig 0.

Den nye bibetingelse, som tager højde for ens lufthavne bliver dermed:

$$\sum_{v=1,\dots,j} \sum_{t \in H(i_m(v))} \left(x_{i_m(v)}^t \gamma_{a1_m(v)}^{a1_m(j)} - x_{i_m(v)}^t \gamma_{a2_m(v)}^{a1_m(j)} \right) - \sum_{v=1,\dots,j} r_v^m \gamma_{a1_m(v)}^{a1_m(j)} - \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(j)} \leq 0$$

Bibetingelsen sørger for, at for hver flyvning, skal antallet af flyvninger som afgår være lig antallet som ankommer og allerede er tilstede i lufthavnen.

Det også værd at bemærke, at i tilfældet af én aflysning og indsættelse af reservemandskab på næste flyvning, er modellen indrettet til *ikke* at indsætte reservemandskab på den efterfølgende. Det antages, at det oprindelige mandskab er i rette position. Omkostningen til reservemandskab skal derfor også inkludere en estimeret omkostning af, at genplacere det oprindelige mandskab korrekt. Ved parvise flyvninger, vil dette i praksis ikke være et problem, da to efterfølgende flyvninger med start og slut i mandskabsbasen altid kan fjernes fra et mandskabs duty. Hvis flyvningerne ikke er parvise, vil det ikke altid være muligt at genplacere mandskabet tidsnok, hvis en flyvning er aflyst.

Bibetingelse (5.9) er til for at sikre, at der ikke bliver brugt mere reserve mandskab end der er til rådighed i hver lufthavn, af hver type. Det gælder for alle lufthavne a med reservemandskab og for alle flådetyper k .

$\delta_m^k = 1$ angiver, at mandskab m , kan betjene flåde type k .

$(r_v^m + q_v^m) = 1$ angiver at et reservemandskab er nødvendigt, til at dække mandskab m 's v 'te flyvning. Hvor den første variabel er lig 1, hvis det er på grund af en aflysning, og den anden variabel er lig 1, hvis det er på grund af enten forsinkelse, eller ville føre til overtrædelse af arbejdsregler. Højst en af dem er lig en, da et reserve mandskab kun er nødvendigt af én grund.

$\gamma_{a1_m(v)}^a = 1$ angiver, at mandskab m 's v 'te flyvning afgår fra lufthavn a .

Sammen giver det, om der tildeles et reserve mandskab, som kan betjene flådetype k , til en flyvning som afgår fra lufthavn a .

$E(a, k)$ er antallet af reservemandskab på vagt i lufthavn a , som kan betjene flådetype k .

Summen af alle reservemandskaber, med flyvninger som letter fra lufthavn a og kan betjene flådetype k , skal være mindre eller lig med antallet af reservemandskab i hver lufthavn for hver flådetype.

For hvilket der gælder:

$$\begin{aligned} 0 &\leq \lambda_r \leq 1 && \forall r \in R \\ 0 &\leq r_v^m, q_v^m \leq 1 && \forall v = 1, \dots, n_m, \forall m \in M \\ x_i^t &\in \{0, 1\} && \forall i \in I, \forall t \in H(i) \\ z_i &\geq 0 && \forall i \in I \\ y_n^{k,a} &\geq 0 && \forall k \in K, \forall a \in A, \forall n \in N(k, a) \end{aligned}$$

Modellen er bygget op af binære eller heltals beslutningsvariabler. Men for nogle af beslutningsvariablerne er det ikke nødvendigt, at definere dem som binære. De vil antage de binære værdier, som følge af bibetingelserne.

x_i^t er binær og antager enten værdien 0 eller 1.

z_i er også en binær beslutnings variabel, men på grund af bibetingelse (5.4) får den enten værdien 0 eller 1 og kan dermed nøjes med kun, at være større eller lig 0.

λ_r skal have værdien mellem 0 og 1, men da den er i objektfunktionen vil den så vidt muligt antage værdien 0 på grund af minimering af omkostning. På grund af bibetingelser som (5.5) og (5.6), skal den i nogle tilfælde være mere end 0 og da resten af variablene i bibetingelserne er heltal, bliver den 1. Derfor er det ikke nødvendigt med en binær restriktion, selvom den essentielt er binær.

q_v^m og r_v^m er igen også binære. Da de også er i objektfunktionen, vil de være så lave som muligt og på grund af henholdsvis bibetingelse (5.7) og (5.8) vil de altid antage værdien 1, når det er nødvendigt at de er forskellige fra 0. Derfor er det kun nødvendigt at de er mellem 0 og 1.

$y_n^{k,a}$ er altid heltal på grund af bibetingelse (5.1), (5.2) og (5.3). Da alle de andre variabler og mængden kun indeholder hele antal fly, kan denne beslutningsvariabel ikke antage andet end heltalsværdier. Det er derfor ikke nødvendigt med anden begrænsning end større eller lig 0.

5.3.3 Tilføjelse i modellen til de større forstyrrelser:

Til større forstyrrelser kunne man tilføje begrænsninger på den/de lufthavne berørt af kapacitetsbegrænsning. Eksempelvis således, at der kun må gennemføres et vis antal operationer i en fast tidsperiode. Det kunne også være en begrænsning på kun den ene type af operationer. Eksempelvis kunne kø til af-isning reducere kapaciteten udelukkende på afgang, hvis kun et begrænset antal fly kunne blive af-iset hver time. Yderligere bibetingelser kan dog øge løsningstiden og bibetingelsen skal derfor kun tilføjes, hvis en løsning stadig kan findes indenfor rimelig tid.

Københavns Lufthavn havde i 2011 234.160 planlagte operationer ifølge Regularitetsstatistik. SAS havde samme år planlagt 99.136 flyvninger igennem Københavns Lufthavn

hvilket er 42,3%. Kapacitetsbegrænsningen er kun relevant i perioder hvor der er planlagt flere operationer end der er kapacitet til. Hvis kapacitetsbegrænsningen er konstant hele dagen, vil det samlet set være værst i den periode flest flyvninger er planlagt. Hvis et flyselskab hovedsagligt har flyvninger planlagt på tidspunkter med få andre flyvninger, vil kapacitetsbegrænsningen i bedste fald ikke give nogen forstyrrelse for netop det flyselskab. Forsinkelserne fra tidligere perioder kan dog påvirke de efterfølgende perioder.

En anden ændring ved større forstyrrelser, er flybalancen i slutperioden i hver lufthavn. Hvis den er for striks, vil der typisk blive aflyst i par. Det kan være en ulempe i forhold til omkostningen af forstyrrede passagerer. Her kan det være billigere at nøjes med en enkelt aflysning og eksempelvis bruge reservemandskab.

Enten kan man slække på balancen eller have recovery perioden over to dage. Ved eksempelvis vintervej, som forventes at vare i et par dage, kan det være en fordel at have længere recovery periode, end hver dag at skulle overholde flybalancerne. Løsningstiden vil dog øges ved en længere recoveryperiode, da både variable og bibetingelser potentielt kan være mere end fordoblet, alt efter hvor mange flyvninger der er hver dag. Til gengæld, kan ulempen ved at slække på flybalancen i slutperioden være, at omkostningerne ved bagefter at flyve flyene tilbage til en mandskabsbase overstiger omkostningen sparet.

Hvis et reservemandskab efter en tildelt flyvning også kan bruges på en returflyvning, kan de tilføjes i antallet af reservemandskab i ankomst lufthavnen. Dette må dog tidligst gøres fra de er til rådighed. I praksis vil det betyde, at det først er fra perioden hvor de er klar at antallet må opdateres. Fordelen ved dette er dog, at de samlede omkostninger kan reduceres yderligere for den periode, i forhold til tidligere. Reservemandskabet kan eksempelvis indsættes på en flyvning, som ellers ville være forsinket indtil det oprindelige mandskab var klar.

5.3.4 Test og resultater af DPM i artiklen

Modellen blev testet ved en simulation af tre forskellige dage, baseret på data fra et større Nordamerikansk flyselskab. Datasættet indeholdt flyvningerne mellem 74 lufthavne, hvoraf tre var "hubs". Hovedlufthavne, som typisk er mandskabsbaser. På de tre dage, var der mellem 1.061-1.073 flyvninger.

Af passagererne var 33,9% tilslutningspassager, 28.445 ud af 83.869. De tilsluttede igennem en af hovedlufthavnene.

Hele recovery perioden, som var en enkelt dag, blev delt op i 16 perioder. Før hver periode blev modellerne løst og beslutningsvariablene valgt til perioden implementeret. Fordi modellerne blev kørt lige før hver periode startede, kunne nyopståede situationer hele tiden medtages, i forhold til at kører recovery en gang og forsøge at følge den plan resten af dagen.

Opdelingen i 16 perioder vil for en dag med flyvninger fra 6-22 være af en times varighed. De fleste flyvninger har en varighed på omkring en time eller derover, derfor vil det også være naturligt at modellen kun køres en gang hver time under normale omstændigheder. Hvis transittiden for tilslutningsrejseplaner, er minimum en time vil kørsel af modellen hver time altid give en løsning, med mulighed for at holde næste flyvning

tilbage. Hvis en flyvning først bliver forsinket efter kørsel af modellen og nogle af disse passagerer skal videre til en anden flyvning i samme periode, så kan det være nødvendigt at løse modellen igen, hvis tiden mellem de to flyvninger bliver mindre end den nødvendige transittid. Modellen kan køres hyppigere hvis der er flere tilslutningsrejseplaner med kort transittid. Dog var der ved test af modellerne ikke meget forbedring fra 12 til 16 stadier. Det tyder på, at situationer hvor forstyrrelser opstår så pludseligt, og hvor transittiden er meget tæt på minimum og begge flyvninger er indenfor samme periode, sjældent falder sammen.

Modellen blev sat på prøve i tre situationer, med *høj*, *gennemsnitlig* og *lav* forstyrrelse.

Forstyrrelse	<i>Høj</i>	<i>Mellem</i>	<i>Lav</i>
15OTP	64,0%	71,6%	89,4%
45FD	21,6%	11,4%	3,6%
Aflyste fly	60	29	9
Procent af aflyste fly	5,6%	2,7%	0,8%
Gns. forsinkelse i min.	26,9	13,8	5,9

Tabel 5.1: OVERSIGT OVER DE TRE DAGE MODELLEN BLEV TESTET PÅ.

I tabel 5.1 er værdier for de tre dage opskrevet. Dagen med mellem forstyrrelse, havde værdier for en gennemsnitlig dag i datasættet.

15OTP er umiddelbart en forkortelse af On-Time Performance inden for 15 minutter, da det er andelen af flyvninger som ikke er forsinket over 15 minutter. 45FD er andelen af flyvninger forsinket mindst 45 minutter, altså umiddelbart; Flight Delay 45 minutter.

I artiklen, er procenten af forsinkede fly på dagen med høj forsinkelse 61,0% og 15OTP med 64,0%. Det betyder, at forsinkede flyvninger ikke kun er de 36,0%, som ankommer mere end 15 minutter efter planlagt. Summen af 15OTP og forsinkede flyvninger skulle i det tilfælde være 100,0%. Da det ikke er defineret hvad der menes med forsinkede, vil andelen ikke bliver brugt til sammenligning. Der kan være stor forskel på antallet af flyvninger som er punktligt på sekundet eller før og flyvninger forsinket med et par minutter.

Resultaterne

Resultaterne for testdagene er ridset kort op nedenfor.

Ved høj forstyrrelse: Antallet af aflyste flyvninger blev reduceret med en tredjedel.

Antallet af forstyrrede passagerer, som måtte blive natten over, blev reduceret med 63,1% og det samlede antal forstyrrede passagerer var 32,3% mindre. Antal minutter, de forstyrrede passagerer blev forsinkede, blev reduceret med 15,9%.

Gennemsnitlig planlagt afgangstid, for aflyste flyvninger, er næsten to timer tidligere end BC og de aflyste flyvninger var i gennemsnit med færre passagerer.

Den gennemsnitlige forsinkelse, for ikke-forstyrrede passagerer er generelt højere, hvilket er meget naturligt, da flyvninger forsinkes for at undgå forstyrrede passagerer.

Gennemsnitlig forsinkelse for alle passagerer falder dog, da der også er en reduktion i antallet af forstyrrede passagerer.

Ved mellem forstyrrelse: Færre flyvninger blev aflyst og der var igen færre passagerer i gennemsnit på de aflyste.

Antallet af forstyrrede passagerer, blev reduceret med 19,4% og antallet af passagerer som ikke nået deres tilslutning reduceret med 36,7%.

Antal overnattende passagerer blev reduceret med 44,4%.

Forsinkelse af ikke-forstyrrede, steg med 1,6% som følge af, at flyvninger blev holdt tilbage, dog kun fra 13,9 til 14,2 minutter i gennemsnit.

Ved lav forstyrrelse: Antal forstyrrede passagerer blev reduceret med 12,3% og antallet af passagerer, som ikke nået deres tilslutning, blev reduceret med 20,0%.

Forsinkelse af ikke-forstyrrede steg med 1,5% som følge af at flyvninger blev holdt tilbage, dog kun fra 5,9 til 6,0 minutter i gennemsnit.

Antal overnattende passagerer blev reduceret med 17,2%

Aflyste flyvninger det samme, men der er færre passagerer på de som blev aflyst.

5.4 Forskellige PRP situationer

De følgende seks eksempler, er baseret på fire forskellige dage, hvor en begivenhed har skabt større forstyrrelser i flytrafikken. Ved begivenheder som har påvirket flytrafikken i flere dage, består eksemplet kun af den dag med højest potentiale for forstyrrelse. Det er set ud fra potentialet for forstyrrelse, da det er uvist ved dagens start, hvor omfattende en forstyrrelse vil blive.

Dagene er med udgangspunkt i Regularitetsstatistik fra Trafikstyrelsen, angående SAS flyvninger fra Københavns Lufthavn i Kastrup.

SAS og CPH er valgt, da det er henholdsvis den største lufthavn i Danmark og det største flyselskab. Alle tal, angående årlige flyvninger fra Scandinavian Airline System og de associerede selskaber, er fra de årlige rapporter fra SAS Group.

Data fra Trafikstyrelsen udelukkende for CPH er valgt af to grunde. For det første, kan en situation med en enkelt primær lufthavn belyses, da statistik fra en enkelt dag med forstyrrelse kan udvælges. For det andet, kan en situation, hvor det antages at alle SAS flyvninger planlægges et sted fra, belyses ved at se på andelen af CPH's flyvninger i forhold til det samlede i SAS.

Statistik og operationer for dagene bliver sammenlignet med statistik for testdagene i modellen.

5.4.1 Forudsætninger

For at kunne sammenligne eksemplerne med testdagene er det nødvendigt at nogenlunde samme forudsætninger har været gældende.

Det antages derfor at:

- Beslutningerne truffet af SAS på dagene har været ud fra den typiske genopretnings rækkefølge. Først fly og dernæst mandskab genoprettes og passagererne til sidst bliver ombooket i tilfældet af forstyrrelse.
- Ekstra mandskab og fly er muligt at indsætte, som minimum fra hovedlufthavnen.
- Tilslutningsrejseplaner er nogenlunde ligeså hyppige.
- Nogenlunde eller mindst ligeså mange forplantede forstyrrelser, er opstået på dagene fra eksemplerne, som i testdagene.
- Modellen kan implementeres og løses på mindst ligeså kort tid.

5.4.2 Trafikstyrelsen

I Regularitetsstatistik på Trafikstyrelsen.dk, er rettidigheden af planlagte operationer for de danske lufthavne samlet. Udtræk af afgang eller ankomst kan hentes ned. Hver rute flyves højst en enkelt gang per dag med en forventet afgang/ankomst tid. Flere flyvninger på samme strækning vil have forskellige rutenumre. I løbet af et år kan der være flere flyvninger med samme rutenummer, men til forskellig forventet tid. Det kan eksempelvis være på grund af sommertid, hvor planen ikke bliver ændret men klokkeslættet bliver.

Det er muligt at se totalen siden 2001 eller vælge år, måneder og dage. Hvis en enkelt dag vælges, er der flere detaljer ud over summen og gennemsnit, som kan ses i bilag 6 på side 90.

Alle flyvningsnumrene er noteret med den planlagte tid for afgang eller ankomst. Om de er gennemført eller aflyst angives ved et et-tal i en af disse kolonner, gennemsnitlig forsinkelse og om den var rettidig eller ej. Når data udtrækkes for en enkelt dag, er der en flyvning per linje og gennemsnitlig forsinkelse er derfor forsinkelsen for netop den flyvning. Rettidig er enten 0 eller 100% af samme grund og det fremgår derfor tydeligt at aflyste flyvninger bliver medregnet i rettidige. Ved at vælge en Lufthavn2 vises de tilhørende flyvninger. Ved at markere en flyvning, vises hvilken lufthavn den er til eller fra. Se bilag 7 på side 91 med udtræk fra alle afgangene fra København den 23. december 2010.

For at kunne sammenligne med de tre testdage, af forskellige forstyrrelse, er det nødvendigt at udregne flere værdier. 15OTP, 45FD, procentdelen af aflyste fly og den gennemsnitlige forsinkelse i minutter af de gennemførte flyvninger som i tabel 5.1 på side 53. Da andet ikke er beskrevet i artiklen, antages det at 15OTP og 45FD er ud af gennemførte flyvninger. I statistik fra trafikstyrelsen, er aflyste flyvninger ikke forsinkede og indgår derfor i antallet af rettidige. Rettidig % er derfor misvisende som 15OTP da et højere antal aflysninger, alt andet lige, vil give en højere procentdel rettidige flyvninger.

Regularitetsstatistik har kun data for Danmark. Derfor bruges afgangsstatisik som ankomster til destinationen, hvor det antages at en afgang i kategorien 15OTP eller 45FD stadig ved ankomst vil have i den kategori. Den gennemsnitlige forsinkelse på afgang bruges dermed som den gennemsnitlige forsinkelse på ankomsten til destinationen. I praksis er det dog muligt at indhente tid, alt efter eksempelvis rutens distance, vind- og

vejrforhold. For korte distancer, ved større forstyrrelser, er det dog naturligt at en flyvning med afgang i CPH beholder sin angivelse i 45FD ved ankomsten.

Eksempelvis, vil en 45 minutters flyvning, som er afgået fra Københavns Lufthavn to timer for sent, umuligt kunne indhente tid nok til at komme i en anden kategori. Ankomsttiden vil dog ikke nødvendigvis være to timer efter planlagt. Omvendt kan en punktlig afgang blive forsinket på grund af problemer ved destinationen, som når der er begrænset kapacitet på landingsbanerne.

Ud af de daglige flyvninger, tælles sammen, både for afgange og ankomster, hvor mange af disse gennemførte operationer som var forsinket op til 15 minutter. Hvor mange var forsinket 45 minutter eller mere og summen af minutter operationerne var forsinket. Aflysninger og gennemførte flyvninger er givet. Sammen giver det antallet af planlagte operationer.

5.4.3 SAS

SAS AB har siden 2009 haft SAS Danmark A/S, SAS Norge AS og SAS Sverige AB som datterselskaber. De primære lufthavne er i henholdvis København (CPH), Oslo (OSL) og Stockholm (ARN). I hovedtræk, betjener de hver især de respektive flyvninger indenrigs og til/fra andre europæiske lande. Ruterne mellem de tre skandinaviske lande er delt.

Data fra SAS igennem København vil indeholde en stor del af operationerne hos SAS Danmark A/S, men ikke alle deres operationer. Eventuelle flyvninger mellem sekundære lufthavne i Danmark, mellem sekundære danske og de to andre skandinaviske lande opereret af SAS Danmark A/S vil ikke fremgå af sættet. Til gengæld, vil de flyvninger mellem København og eksempelvis Stockholm, betjent af SAS Sverige AB, være i sættet. Dermed er alle SAS flyvningerne igennem Københavns Lufthavn ikke nødvendigvis alle og eksklusivt SAS Danmark A/S flyvninger.

Her bliver SAS CPH betegnelsen for et selvstændigt flyselskab, som udelukkende betjener alle de SAS operationer igennem Københavns Lufthavn. Deres flyvninger i 2012 til de 20 største destinationer er som i bilag 7 på side 93.

Hvis alle flyvninger i SAS i stedet blev planlagt og opereret samlet, ville operationerne igennem Københavns Lufthavn kun være en del af de totale flyvninger. Det selskab bliver nu betegnet som SAS TOTAL.

SAS CPH: Data fra trafikstyrelsen angående SAS flyvninger udgør datasættet for alle operationer i SAS CPH.

Afgangene bruges, som beskrevet tidligere, som ankomststatistik for destinationerne.

SAS CPH planlægger og opererer kun flyvninger igennem Københavns Lufthavn. Men der kan stadig være passagerer, som har rejseplaner som består af en flyvning med SAS CPH og et andet selskab. Eksempelvis, en rejseplan fra Københavns Lufthavn til Tromsø med tilslutning i Oslo, da der ikke er en direkte rute. Begge flyvninger vil være med SAS men kun den fra Københavns Lufthavn vil være med SAS CPH. Der kan være to typer af disse kombinationsrejseplaner, når der maksimalt er to flyvninger i rejseplanerne.

Hvis første flyvning er med SAS CPH, kan man tage højde for forsinkelser, som fører til forstyrrede passagerer, i fastsættelsen af forsinkelseomkostningen som gennemgås senere.

Hvis der er mange tilslutningsrejseplaner, hvoraf kun sidste flyvning er med SAS CPH, kan en bibetingelse inkluderes i modellen. Den kunne være baseret på bibetingelse (5.5). Den angav rejseplanen som forstyrret, hvis første flyvning afgik på et tidspunkt, som gjorde tilslutning til næste flyvning umulig.

Ligesom C var mængden af tilslutningsrejseplaner, kunne der være et sæt L' af SAS CPH rejseplaner med en enkelt flyvning, hvor denne flyvning er den sidste i en tilslutningsrejseplan med SAS. Det betyder også, at der bliver flere forskellige rejseplaner, når hver rejseplan kan blive splittet op i flere alt efter hvilke andre flyvninger de tilsluttede fra.

Hvis første flyvning blev forsinket, med det andet selskab, ville nogle afgangstidspunkter for flyvningen blive uopnåelige for rejseplanen. Hvis flyvningen afgik på et tidspunkt i denne mængde, skulle rejseplanen angives som forstyrret.

Bibetingelsen må igen kun tilføjes til modellen så længe en løsning kan findes inden for kort tid.

SAS CPH er et mindre selskab med en enkelt hovedlufthavn. De har højst kun en tredjedel, af det antal operationerne testdagene dagligt havde. Der kan dog stadig, være ligeså mange tilslutningsrejseplaner, hvor mindst en af flyvningerne er igennem Københavns Lufthavn. Men SAS CPH kan risikere, at de kun opererer den ene flyvning. Det giver en mindre mulighed, for at forhindre forstyrrede passagerer.

SAS TOTAL Hvis datterselskaberne under SAS AB i stedet blev opereret og planlagt under et, ville en begivenhed, som ramte en af de primære lufthavne, potentielt forstyrre en mellem andel flyvninger og muligvis også give forplantede forstyrrelser.

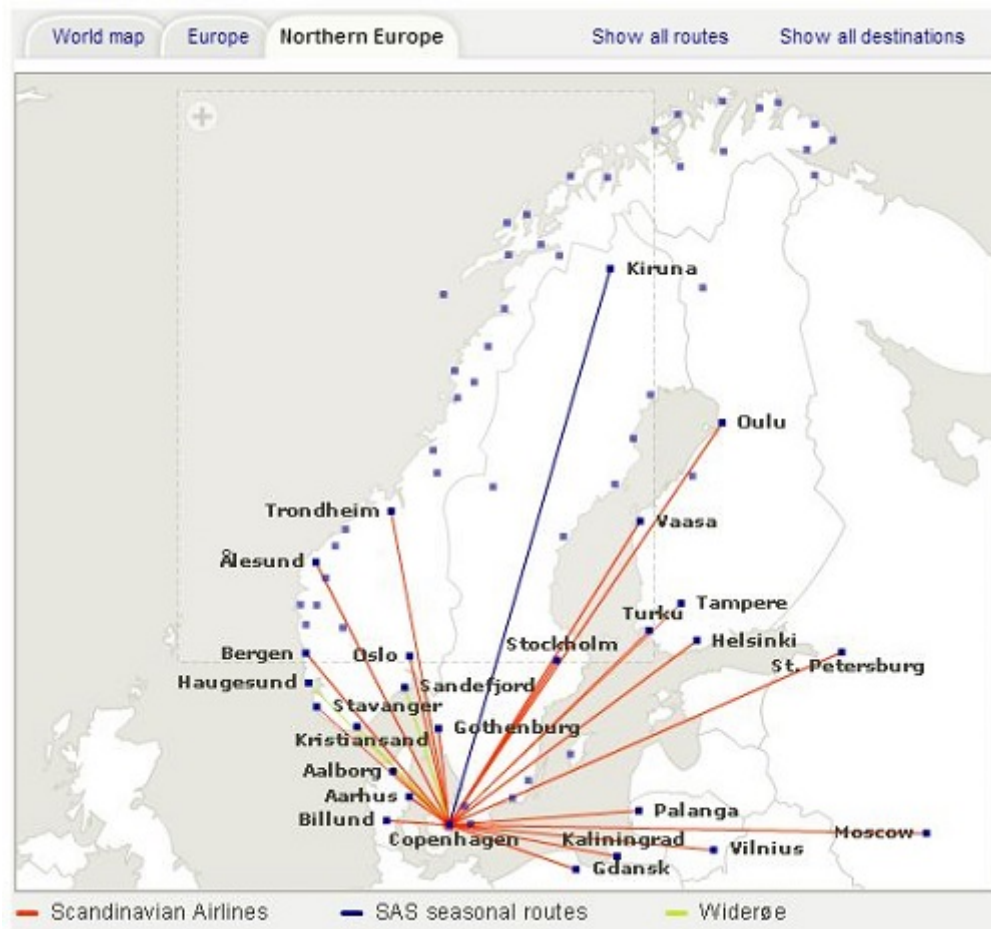
Når SAS TOTAL bliver planlagt og styret samlet, vil det give en større mulighed for at undgå forstyrrede passagerer som ikke når deres tilslutning. De sekundære lufthavne bliver fortrinsvis betjent af hovedlufthavnen i det respektive land og derfor vil rejser mellem sekundære lufthavne og andre lande ofte gøre en tilslutning igennem en hovedlufthavn nødvendig.

Se figur 5.1 hvor alle flyvningerne fra Københavns Lufthavn og andre skandinaviske lufthavne er indtegnet. Flere af de norske og svenske byer har ruter til og fra deres respektive hovedlufthavne og en tilslutning igennem Oslo eller Stockholm giver endnu flere mulige destinationer fra København.

I 2011 havde selskaberne under SAS AB ifølge tal fra den årlige rapport¹ i gennemsnit 683 daglige planlagte flyvninger og 90 destinationer. SAS havde 22.912.000 passagerer svarende til et dagligt gennemsnit på 62.772 og 147 fly.

SAS TOTAL er med sine tre hovedlufthavne lig det større Nordamerikanske flyselskab fra testdagene. SAS TOTAL har til gengæld færre daglige operationer og passagerer, end der var på en enkelt testdag.

¹Fra sasgroup.net



Figur 5.1: DESTINATIONER I SAS TIL RESTEN AF VERDEN
Fra sasgroup.net

De planlagte flyvninger med SAS, igennem Københavns Lufthavn, var i gennemsnit 272 om dagen. Ud af de 683 SAS AB flyvninger, var 39,8% af flyvningerne igennem Københavns lufthavn. En begivenhed i Københavns Lufthavn kunne i 2011 potentielt forstyrre omkring 40% af flyvningerne og derudover også give forplantede forstyrrelser.

Statistik for de 39,8% af SAS flyvningerne, igennem Københavns Lufthavn i 2011, er tilgængelig. Statistik for de resterende 60% af flyvningerne i SAS TOTAL mangler. De resterende flyvninger for SAS TOTAL, sættes derfor til "best case" værdier. Her antages det, at den resterende andel af flyvninger, ankommer punktligt og uden aflysninger. Det er meget usandsynligt, men giver et billede af hvor omfattende forstyrrelsen er, selv hvis de andre lufthavne ikke får forplantet forstyrrelse og ellers har perfekt drift.

Best case:

- De resterende flyvninger, udenfor Københavns Lufthavn, inkluderes i antal punktligt flyvninger.
- Summerne forbliver uændret af; flyvninger forsinket mere end 45 minutter, aflyste og forsinkelser i alt.

- 15OTP, 45FD og den totale forsinkelse, i Københavns Lufthavn, bliver ud af antallet af gennemførte flyvninger for SAS TOTAL.

Resultatet af aktuelle og “best case” flyvninger, giver et billede af, hvor stor forstyrrelsen som minimum blev for SAS TOTAL.

Hvis alle flyvninger i SAS TOTAL blev planlagt et sted, kunne duties ikke være lige så begrænsede af at skulle returnere til til hovedlufthavnene efter hver flyvning. Duties kunne så eksempelvis bestå af en flyvning fra København-Bergen-Oslo-København. For SAS CPH ville Bergen-Oslo være betjent af et norsk mandskab. En større forstyrrelse, i den ene primære lufthavn, ville sandsynligvis forplante sig ud til de andre lufthavne.

For at tage højde for sæsonudsving, antages det at andelen af SAS flyvninger igennem Københavns Lufthavn, på en given dag, er lig den gennemsnitlige andel af de årlige flyvninger. Det vil sige, at hvis Københavns Lufthavn i gennemsnit havde 40% af årets flyvninger, så vil dagen i eksemplet for SAS TOTAL have omkring 40% af alle deres flyvninger igennem Københavns Lufthavn. Dermed bliver der ikke taget højde for udsving som eksempelvis er på grund af nationale helligdage eller åbning/lukning og ændring af frekvens på ruterne i løbet af året. Eksempelvis har SAS åbnet en direkte rute fra Københavns Lufthavn til San Fransisco, Californien i april 2013, som alt andet lige, vil øge andelen af flyvninger igennem CPH.

Antallet af flyvninger i SAS TOTAL, består dermed ikke af det daglige gennemsnit for det pågældende år.

5.4.4 Fastsættelse af omkostning

SAS følger EU forordning EC 261/2004². Passagerer ved forsinket afgang fra 2 timer er; berettiget til måltider/ forfriskninger og hotel/transport, hvis ventetiden er natten over.

I modellen er forsinkelsesomkostningen for passagerer kun ved forsinket ankomst af sidste flyvning. Hvis omkostningen skal afspejle forsinket afgang, skal modellen tilrettes lidt.

I stedet for at det kun er antallet af ikke-forstyrrede passagerer på sin sidste flyvning, skal det være alle ikke-forstyrrede passagerer på flyvningen. Forskellen er, at der også er en omkostning for ikke-forstyrrede passagerer, som kun forsinkes på første flyvning ud af flere.

I tilfælde med forstyrrelser på grund af vejret, er passagerer i forhold til EU forordning EC 261/2001 ikke berettiget til compensation ved forsinkelse og aflysning. Omkostningerne kan dermed sættes til estimerede værdier kun af kost og logi i perioden.

Eksempelvis, kan forsinkelses omkostningen d_i^t , for ikke-forstyrrede passagerer, fastsættes til 0 kroner for flyvninger under 1.500 km, som er forsinket under to timer. Og tilsvarende for flyvninger af længere distancer.

Forstyrrelses-omkostningen kan sættes til en estimeret omkostning ved forplejning resten af dagen og en enkelt overnatning. Hvis der er stor forskel på kost og logi ved de forskellige lufthavne, kan det fastsættes efter den dyreste afgangslufthavn i rejseplanen.

²sas.dk

Da der ved aflysning er mulighed for at få refunderet op til hele billetens pris, kan forstyrrelses omkostningen eventuelt forhøjes ved de dyre billetter.

Ved begge omkostninger er det her er ikke nødvendigt med et beløb for tab af goodwill, da det er forstyrrelser affødt af vejrforhold, flyselskabet ikke har magt over.

Forsinkelses omkostningerne for mandskab, på de forskellige flyvninger, udregnes ud fra dutyerne. Det kan eksempelvis være, med en fast procentsats for hver tidsperiode hver duty forlænges. Nogle duties, vil være kortere end andre og en forsinkelse vil måske være til en lavere yderligere sats. Andre duties, kan allerede være så lange, at ekstra forsinkelse vil være til meget høje mandskabsomkostninger.

Tilslutning med andre flyselskaber Hvis passagerer tilslutter til flyvninger fra andre flyselskaber, kan en forsinkelse give en forstyrret passager og en øget omkostning. Situationen gælder kun samarbejdspartnere, hvor hele rejsen er bestilt samlet. Dette vil især ske ved SAS CPH som selvstændigt flyselskab, da der kan være flere rejseplaner som inkluderer flyvninger opereret af de forskellige datterselskaber.

Hvis kost og logi dækkes af flyselskab med den forsinkede flyvning, eller hvis omkostningen deles mellem begge flyselskaber, er der dermed endnu større fordel i at undgå/reducere forsinkede passagerer som skulle fortsætte rejsen med samarbejdspartner/søsterselskab. Den forsinkede passager bliver reelt forstyrret, men vil kun angives som forsinket for flyselskabet.

På tilslutningsrejseplaner, hvor den efterfølgende flyvning ikke er med SAS CPH, kan omkostningen af forsinkelsen sættes endnu højere end normalt, når flyvningen er forsinket længere end at en tilslutning er mulig. (Ud fra antagelsen at flyvning med næste flyselskab ikke holdes tilbage.) Hvis en flyvning forsinket med 4 timer gør tilslutningen umulig, kan forsinkelsesomkostningen sættes til en værdi som dækker både kost og logi.

Det vil stadig være en mulighed for de andre flyselskaber, at holde deres flyvninger tilbage for at få tilslutningspassagerer med, således at omkostningen ikke bliver realiseret.

5.4.5 Potentialet for forstyrrelse på de udvalgte dage

Som nævnt tidligere i potentiale for forstyrrelse på side 15, kan flere faktorer afgøre, hvor stor en forstyrrelse bliver.

De tre tidligere nævnte faktorer er; hvilket område begivenheden er i, varigheden og kapacitesbegrænsning den medfører.

Men den vigtigste faktor for et flyselskab er; hvor mange flyvninger der er planlagt igennem det berørte område.

Sandy oktober 2012 I oktober 2012 var der igennem Københavns Lufthavn fire SAS aflysninger til og fra New York. Afgangene den 29. og 30. oktober og ankomsterne den 30. og 31. oktober. SAS har kun flyvninger til Newark, men alle tre lufthavne omkring New York var lukket den 29. og 30. oktober. Flyvningerne er aflyst i par fra CPH, så andre fly og andet mandskab er sandsynligvis ikke forstyrret andre steder, da det er en lang flyvning til NY. Den meget store forstyrrelse af flytrafikken, påvirkede ikke SAS flyvninger meget.

Vintervejrh Heathrow 2010 I 2010 blev lidt flere flyvninger hos SAS aflyst. Vintervejret førte til lukning af Heathrow lufthavn fra middagstid den 18. december og først genåbnede gradvis fra den 20. til 21. december. Ingen SAS flyvninger mellem Heathrow og København blev gennemført den 19. december. Den 20. december var der tre hver vej og den 21. december tre fra Kastrup og fire til.

Heathrow har lidt flere daglige flyvninger i gennemsnit end hver af de tre lufthavne omkring New York, men isoleret set blev flere flyvninger forstyrret ved orkanen end snevejret. For SAS flyvninger, var det dog situationen i Heathrow, som førte til flest forstyrrelser.

5.4.6 Forskellige større forstyrrelser

De kommende eksempler, deles op i to grupper efter andelen af flyvninger som potentiel forstyrres. Mellem og lille andel af flyvninger.

En mindre andel af flyvninger, kan blive forstyrret hvis det blot er sekundære lufthavne eller hvis der ikke er mange af flyselskabets flyvninger i området. En mellem andel af flyvningerne vil typisk være, hvis det kun er en enkelt af flere primære lufthavne eller flere sekundære, hvor højst halvdelen af flyvningerne opererer i det berørte område eller den berørte lufthavn.

Der inddeles i to tilfælde af kapacitetsbegrænsning. Da en lille kapacitetsbegrænsning i bedste fald ikke giver nogen forstyrrelse, er de inddelt i varierende og mellem kapacitet. Mellem er højst 50% af kapaciteten. Ved en fuldstændig lukket lufthavn, er der ingen mulighed for passagerrecovery for flyselskabet.

Kapacitet	SAS CPH:	SAS TOTAL:
	Mindre andel af flyvningerne	Mellem andel af operationer
Mellem	EUR 21/1-13	CPH 23/12-10
Varierende	LHR 20/12-06	CPH 9/12-12

Tabel 5.2: DE FORSKELLIGE SITUATIONER, HVOR FORSTYRRELSE KAN OPSTÅ

I tabel 5.2 giver de to kapacitetsbegrænsninger og to andele fire forskellige situationer. Alle eksemplerne er noteret med dato og område/lufthavnskode for de steder hvor begivenheden indtraf.

En begivenhed, som indtraf i Københavns Lufthavn, ville for SAS CPH potentielt forstyrre en stor andel flyvninger. De to tilfælde af mellem andel for SAS TOTAL er eksempler på dette.

Eksemplerne er dog meget lig hinanden, hvorfor en stor andel for SAS CPH ikke bliver gennemgået. To forskelle gør sig gældende.

-Nogle af tilslutningsrejseplanerne, igennem SAS, er ikke udelukkende med flyvninger hos SAS CPH. Muligheden for at reducere forpassede tilslutninger er derfor mindre.

-Med kun en mandskabsbase, kan der være mindre mulighed for indsættelse af reservemandskab og fly.

De to forskelle bliver også nævnt i følgende to eksempler for SAS CPH.

Da eksemplerne udelukkende består af enkelte dage, har varigheden ingen betydning.

SAS CPH: Vintervej Europa 21/1-13

Vintervejret i Europa er et tilfælde, hvor en mindre andel af flyvninger hos SAS CPH kunne blive forstyrret. I flere Europæiske lufthavne var kapaciteten reduceret, primært på grund af sne fald.

Dette vintervejr, er ikke tidligere nævnt i forstyrrelser og bliver ridset kort op:

Situationen var værst i Paris, med omkring 40% aflysninger som primært var korte strækninger. I Heathrow, hvor omkring en femtedel af de planlagte 1300 flyvninger blev aflyst. Andre lufthavne som München, Frankfurt og Bruxelles var også ramt af vintervejr.

		Den 21. januar 2013					
CPH	Rute	Gennemført	Aflyste	Gns.fors.	Rettidig	Planlagt	I alt
Fra	Total	156	7	12	77%	163	} 328
Til	Total	158	7	11	81 %	165	

Tabel 5.3: DATAUDTRÆK FOR 21. JANUAR 2013, CPH OG SAS.

I tabel 5.3 ses totalen og gennemsnittet for den 21. januar, hvor i alt 14 flyvninger blev aflyst og kun 77% og 81% af de planlagte flyvningerne henholdsvis fra og til CPH var rettidige.

Udregningerne af de forskellige værdier for flyvningerne den dag, er opgjort i tabel 5.4. De hyppigste aflysninger for SAS CPH viste sig at være to til og to fra Frankfurt ud af en sum på otte planlagte. Ingen af de sammenlagt seks planlagte flyvninger til og fra Paris blev aflyst.

	Afgange	Ankomster	Begge
Planlagt	163	165	328
15OTP	118	127	245
% af operationer	75,6%	80,4%	78,0%
% af planlagte	76,7%	81,2%	79,0%
45FD	7	9	16
% af operationer	4,5%	5,7%	5,1%
% af planlagte	4,3%	5,5%	4,9%
Aflysninger:	7	7	14
% af planlagte	4,3%	4,2%	4,3%
Gns forsinkelse i minut	12,9	11,6	12,2

Tabel 5.4: RESULTATER FOR 21. JANUAR 2013, CPH OG SAS.

Når afgangene fra Københavns Lufthavn, bruges som ankomst statistik for destinationerne, bliver summen resultaterne for alle ankomster i SAS CPH.

Resultaterne er indsat i tabel 5.5, ved siden af mellem testdag. Pilene til venstre angiver om værdierne går op eller ned ved højere forstyrrelse. Værdierne er tættest på

en *mellem* forstyrrelse. Antal aflysninger er lidt tættere på *høj* forstyrrelse og flyvninger forsinket mere end 45 minutter, er tættere på *lav* forstyrrelse.

Forstyrrelse		Testdag: <i>mellem</i>	21/1-13 SAS CPH
15OTP	↓	71,6%	78,0%
45FD	↑	11,4%	5,1%
Procent af aflyste fly	↑	2,7%	4,3%
Gns. forsinkelse i min.	↑	13,8	12,2

Tabel 5.5: SAMMENLIGNING AF *mellem* OG 21. JANUAR 2013, CPH OG SAS.

I Regularitetsstatistik blev aflyste flyvninger efter 2008, opgjort med 0100 som planlagt tidspunkt. Ved at vælge hele måneden og ruten, fremgår det/de planlagte tidspunkter. På den måde bliver flyvningerne, eksempelvis til Frankfurt, klarlagt den dag. Se tabel 5.6.

Fra CPH	Planlagt	Afgået	fra FRA	Planlagt	Ankommet
SK639	0715	aflyst	SK640	1110	aflyst
SK1637	1005	1237	SK1638	1355	1657
SK675	1425	aflyst	SK676	1900	aflyst
SK1635	1750	1822	SK1636	2145	2216

Tabel 5.6: DATA FRA 21 JANUAR 2013, CPH/FRA OG SAS.

Det ser ud til at flyvningerne mellem København og Frankfurt er aflyst parvist. En flyvning fra København til Frankfurt tager omkring halvanden time og det giver mindst 50 minutter før næste planlagte flyvning i Frankfurt. De kunne endda også være dobbelt parvist, hvor to hold mandskab dækkede hele dagen mellem København og Frankfurt, men med en endnu længere pause mellem flyvningerne i København.

Hvis nogle af aflysningerne, udelukkende er fordi de er aflyst i par, kan antallet måske reduceres. Her vil et reservemandskab og ekstra fly være en mulighed. Flybalancen kan eventuelt slækkes på, i de lufthavne det er muligt.

Selv hvis alle aflysningerne er gjort på baggrund af kapacitetsbegrænsningen i lufthavnene, kan det være en fordel at ændre hvilke flyvninger, som blev aflyst. I gennemsnit blev tidligere flyvninger aflyst og med færre passagerer, på testdagene med mellem forstyrrelse.

Der kan være en mulighed, for at reducere den gennemsnitlige forsinkelse for alle passagerer. Her kan ombytning af fly eller reservemandskab og ekstra fly være en mulighed.

Dermed kan flyvninger, som eller blev holdt tilbage, afgå tidligere, indtil fly og mandskab var klar efter tidligere forsinkelse. Ved kombinationsrejseplaner kan nogle af forsinkelsesomkostningerne sættes ligeså højt som ved forstyrrelse. Det er ved de forsinkelser, som fører til at passagererne ikke kan tilslutte til næste flyvning uden for SAS CPH.

Da der ikke er mange flyvninger forsinket i mere end 45 minutter, er der måske ikke meget fordel i, at forsinke nogle af de efterfølgende flyvninger for at undgå forstyrrede

passagerer. Men selv i lav forstyrrelse gik den gennemsnitlige forsinkelse af ikke-forstyrrede passagerer op. Det er tegn på, at der her kan være en fordel i at holde flyvninger tilbage.

Hvis der er mange passagerer med kombinationsrejseplaner, kan bibetingelsen tilføjes for at undgå forstyrrede passagerer. Altså, dem som ikke kan nå den anden flyvning, som er med SAS CPH, hvis første flyvning er forsinket. Forstyrrede passagerer kan dermed reduceres, selv hvis første del af rejsen ikke er med SAS CPH.

Ved den mindre andel, af potentielt forstyrrede flyvninger, for et mindre flyselskab, er der færre muligheder for forbedringer. Reservemandskab og ekstra fly, vil typisk kun kunne indsættes fra mandskabsbasen i Københavns Lufthavn. Hvis aflysningerne er på grund af kapacitetsbegrænsningerne i de andre lufthavne, er det måske heller ikke muligt at reducere antallet af aflysninger. Men det kan stadig være en fordel, enten at ændre på hvilke flyvninger som aflyses og udsætte afgang på flyvninger for at undgå, at passagerer ikke når deres tilslutning.

SAS CPH: Tåge LHR 20/12-06

SAS CPH hvor en mindre andel flyvninger potentielt kan blive forstyrret.

Som beskrevet tidligere på side 7 var kapaciteten i Heathrow reduceret den 20. december 2006 på grund af tyk tåge. Da det er en lille andel af flyvninger fra SAS København som betjener strækningen, ville det potentielt kun føre til, at et mindre antal flyvninger mellem Kastrup og Heathrow kunne blive forstyrret.

I dette tilfælde blev langdistanceflyvningerne prioriteret og den 20. december blev blot fire flyvninger aflyst, ud af 12 planlagte, to til og to fra Heathrow. Kapaciteten var reduceret med omkring 40% men fordi det primært var indenrigsflyvningerne, som blev aflyst, varierede kapaciteten i løbet af dagen.

Den 20. december 2006							
CPH	Rute	Gennemført	Aflyste	Gns.fors.	Rettidig	Planlagt	I alt
Fra	Total	154	5	17	72%	159	} 318
Til	Total	154	5	18	67 %	159	

Tabel 5.7: DATAUDTRÆK FRA 20. DECEMBER 2006, CPH OG SAS.

Samlet set, var der igennem Københavns Lufthavn planlagt 318 flyvninger. 10 blev aflyst, se tabel 5.7. Netop den dag var det fordelt ligeligt med 159 flyvninger og 5 aflysninger hver vej. Af de aflyste var de fire, som nævt tidligere, igennem Heathrow. En sæt flyvninger til og fra Bruxelles og Aarhus, en til Chicago og en fra Gdansk. Da flyvningen næste dag fra Chicago også er aflyst, ser tendensen ud til at aflysninger sker parvis, især fordi aflysningerne fra København til Heathrow, Bruxelles, Aarhus og Chicago er før aflysningerne af flyvningerne fra samme lufthavne til København. Dermed er fly og mandskab bibeholdt i mandskabsbasen i Københavns Lufthavn, hvis samme fly og manskab bruges til hver par.

I tabel 5.8 er resultatet af udregningerne for den 20. december 2006 for flyvninger igennem Københavns Lufthavn.

	Afgange	Ankomster	Begge
15OTP	109	102	211
% af operationer	70,8%	66,2%	68,5%
% af planlagte	71,7%	67,3%	69,5%
45FD	14	14	28
% af operationer	9,1%	9,1%	9,1%
% af planlagte	8,8%	8,8%	8,8%
Aflysninger:	5	5	10
% af planlagte	3,1%	3,1%	3,1%
Gns forsinkelse i minut	17,9	18,4	18,1

Tabel 5.8: OPTÆLLING AF FLYVNINGER FRA 20. DECEMBER 2006, CPH OG SAS.

Når afgang fra Københavns Lufthavn i SAS CPH bruges som værdier for ankomster til destinationerne, bliver gennemsnits værdierne i sidste kolonne, til værdierne for alle SAS CPH ankomster.

Tilfældigvis, er den samme andel af ankomster og afgang forsinket mere end 45 minutter. Forsinkelsen for ankomster i Københavns Lufthavn er dog lidt længere i gennemsnit. I tabel 5.9, er resultaterne for dagen opstillet ved siden af værdierne for de dage modellen var testet på, både *høj* og *mellem* forstyrrelse.

Forstyrrelse		Testdage:		20/12-06
		<i>høj</i>	<i>mellem</i>	SAS CPH
15OTP	↓	64,0%	71,6%	68,5%
45FD	↑	21,6%	11,4%	9,1%
Procent af aflyste fly	↑	5,6%	2,7%	3,1%
Gns. forsinkelse i min.	↑	26,9	13,8	18,1

Tabel 5.9: SAMMENLIGNING AF *høj* OG *mellem* OG 20. DECEMBER 2006.

Den 20. december er tættest på *mellem* forstyrrelse.

Københavns Lufthavn vil være den primære tilslutningslufthavn. Men som nævnt tidligere, kan der ved mange kombinationsrejseplaner med SAS, indsættes en bibetingelse for at undgå forstyrrede passagerer som ikke når sin tilslutning til eller fra SAS CPH. Når der eksempelvis ikke er flyvninger direkte mellem Aalborg eller Aarhus og London, kan der tilsluttes igennem København Lufthavn.

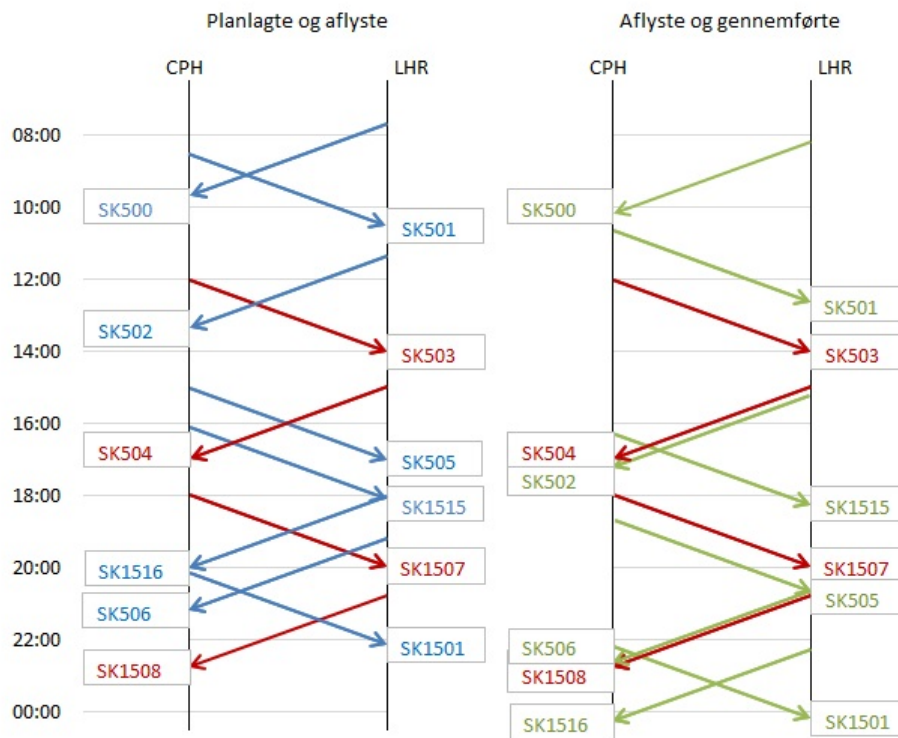
Når flyvningerne bliver aflyst i par som her, er der en mulighed for at reducere passageromkostningerne ved forstyrrelse, ved at indsætte ekstra fly/mandskab og blot aflyse en enkelt flyvning i parret. Det kræver dog, at der er fly/mandskab ledigt i lufthavnen

I test af modellen blev aflysninger reduceret med 6,9% ved mellem forstyrrelse, fra 29 til 27 aflysninger. Her er kun 10 flyvninger aflyst, men selv en enkelt aflysning mindre vil reducere antallet af forstyrrede passagerer.

Dog vil en enkelt aflysning mindre ikke overholde flybalancen for slutperioden, da der vil være et fly for meget i en lufthavn og et for lidt. Denne bibetingelse kan derfor slækkes på i modellen. Recoveryperioden kan strækkes over flere dage, så længe en løsning stadig

findes indenfor kort nok tid.

Flyvningerne til og fra Heathrow er sandsynligvis dem med mest fordel at se på. I figur 5.2 er flyvningerne mellem København og Heathrow indtegnet. Her er antaget, at alle flyvninger mellem Københavns Lufthavn og Heathrow varer 2 timer, hvilket er den typiske planlagte rejsetid. For at give større overblik over forløbet, er figuren til venstre de planlagte flyvninger markeret med blå og aflyste i rød. Alle de gennemførte i grøn og aflyste igen i rød er i figuren til højre.



Figur 5.2: ALLE FLYVNINGERNE MELLEM KØBENHAVNS LUFTHAVN OG HEATHROW DEN 20. DECEMBER 2006

To af flyvningerne fra Heathrow er så forsinkede, at de hver afgår omkring tidspunktet for den næste planlagte flyvning, som viser sig at være aflyst. SK502 afgår 19 minutter senere end planlagte afgang for aflyste SK504.

SK506 afgår 8 minutter før den aflyste SK1508. I Københavns Lufthavn afgår SK501 en time og 19 minutter før SK503, som blev aflyst og SK505 40 minutter efter aflyste SK1507.

Alle passagererne på de aflyste flyvninger bliver forstyrrede.

De skal bookes på en ny flyvning, hvor der er plads. I 2006 var den gennemsnitlige load factor 74,4%, så hvis alle flyene på ruten var lige store og omkring trekvart fyldt, vil det kræve tre flyvninger for hvert aflyste fly, før alle passagerer har fået plads. Dermed vil to aflyste og fire gennemførte flyvninger sandsynligvis ikke være nok til, at alle passagerer kom frem samme dag.

Ifølge flådebeskrivelsen på SASgroup.net ligger passagerantalet per fly på mellem 98 til 264 sæder. Eksempelvis kunne alle flyvningerne den 20. december, mellem København og Heathrow, blevet fløjet af en Airbus A319-100 med tidligere loadfactor. Den har en kapacitet på 141 passagerer. Præcis 105 passagerer ville være på hvert fly og 36 pladser ville være ledige.

De to første flyvninger, afgår mindst en time før første aflysning, fra den respektive lufthavn. Det vil sjældent være muligt at nå at ombooke nogle forstyrrede passagerer til disse flyvninger. Afgørelsen blev måske endda først truffet efter de første flyvninger var påbegyndt.

Hvis man ser bort fra ledige sæder på de to første flyvninger, da de er før aflysningerne, så vil to aflysninger hver vej give 210 forstyrrede passagerer i hver lufthavn.

Tre flyvninger hver vej, med 36 ledige pladser, giver 108 passagerer fra hver lufthavn, som kan komme på en ny flyvning samme dag. 102 passagerer vil derfor skulle bruge kost og logi til dagen, efter hvor de forhåbentlig fik plads på en ny flyvning. Hvis eksempelvis, en enkelt overnatning koster 500,- i gennemsnit per passager og en enkelt diæt per passager er 100,- per person, ville omkostningen af de 102 passagerer i hver lufthavn være 61.200,-.

Hvis kun den ene bliver aflyst, ville 105 af passagererne ikke blive forstyrrede. Mindst et og op til fire af flyvningerne, bliver gennemført efter aflysningen. Det kommer an på, hvilken en af de aflyste flyvninger, som bliver gennemført. Af de 105 forstyrrede passagerer ville 36 af dem kunne ombookes på et nyt fly samme dag, og muligvis alle passagererne. Alle tallene er gennemsnit og der kan være stor forskel på både flykapacitet og loadfactor.

I *mellem* forstyrrelse blev overnattende passagerer reduceret med 44,4%.

Hvis det ikke er muligt at reducere antallet af aflysninger, så kan der stadig være en fordel i at aflyse andre flyvninger i stedet.

Flyvning SK504 bliver aflyst og alle disse passagerer bliver forstyrrede, SK502 som er planlagt før det, er næsten 4 timer forsinket og risikoen for at passagererne ikke når en tilslutning er stor. Hvis SK502 i stedet blev aflyst og SK504s ankomst kun var 21 minutter efter planlagt, fordi den afgik på det nu aflyste flys tidspunkt, så ville der være ligeså mange forstyrrede på grund af aflysning, men sandsynligvis flere som kunne nå deres tilslutning.

Det er heller ikke sikkert, at det aflysningerne kan ændres. Men det kan stadig være en fordel, at holde andre flyvninger tilbage for at tilsluttende passagerer når deres flyvning.

Forsinkelserne fra Heathrow, kan forplante sig ud i netværket og effekten af dette kan reduceres og måske endda undgås. Eksempelvis ved at bruge reserve mandskab. De flyvninger, som blev forsinkede indtil det oprindelige mandskab var klar, kunne i stedet gennemføres tidligere med reservemandskab.

Igen vil der være færre muligheder, da selskabet er mindre end det på testdagene. Men tre ting giver på denne dag mulighed for en reduktion i antallet af forstyrrede passagerer og dermed potentielt lavere omkostning. Da flyvningerne er aflyst i par, kan der være en fordel i at undlade at aflyse en eller flere af flyvningerne. En ændring af hvilke flyvninger som aflyses kan også gøre en forskel. Og tilsidst kan flyvninger holdes tilbage for at få tilslutningspassagerer med.

SAS TOTAL: Vintervejr CPH 23/12-10

En situation hvor én primær lufthavn ud af flere, er ramt af en begivenhed som kan give mellem kapacitet. Her antages det at alle tre datterselskaber i SAS AB bliver planlagt et sted fra. Denne situation er med mellem kapacitet, da der kun var mulighed for at bruge en enkelt startbane af gangen, hvorimod der normalt er en til afgang og en til ankomster.

Den 23. december 2010 var en dag med meget sne og fygning. Kun en bane var åben af gangen, så de skiftevis kunne ryddes. Når en enkelt bliver brugt til begge dele bliver kapaciteten reduceret til højst 50% af den maksimale og sikkerhedsafstanden må være større. Når begge dele skal foregå på samme startbane, er det tydeligt, at der er færre operationer, som kan foretages inden for samme tidsperiode. Ved landing decelereres og derefter kører flyet af banen, ved start kører flyet ind på startbanen og accelererer. Når kapaciteten er begrænset, er det selvfølgelig kun et problem, hvis der er planlagt flere flyvninger end der er kapacitet til.

I lufthavnen stod flyene også i kø til afisning. Efter af-isning skal de i luften inden for 20 minutter eller af-ises igen.

Regularitetsstatistik fra Trafikstyrelsen for den 23. december 2010 ses i tabel 5.10

Den 23. december 2010							
CPH	Rute	Gennemført	Aflyste	Gns.fors.	Rettidig	Planlagt	I alt
Fra	Total	78	3	60	7%	81	} 172
Til	Total	87	4	71	13%	91	

Tabel 5.10: DATAUDTRÆK FOR 23. DECEMBER 2010, CPH OG SAS.

De planlagte operationer denne dag, var 172 hvor imod gennemsnittet per dag var 271, ifølge den årlige sum fra Trafikstyrelsen for 2010. Den primære årsag til dette, kan være da det er op til helligdagene. Den 24. december var der eksempelvis kun 17 flyvninger planlagt til og fra Københavns Lufthavn. Det antages at sæson udsvingene er ens for alle selskaber i SAS.

Når gennemsnittet igennem Københavns Lufthavn var 271 og gennemsnittet for alle datterselskaber i SAS var 667, betjener Københavns Lufthavn i gennemsnit 40,6% af de daglige flyvninger. Hvis de 172 igennem Københavns Lufthavn var 40,6% af flyvningerne i SAS, var det samlede antal operationer i SAS TOTAL 424.

SAS TOTAL's bedst mulige resultat for dagen er opkrevet i tabel 5.11, hvor de resterende flyvninger er best case.

Der er stor forskel på tallene fra Københavns Lufthavn og de valgte værdier for "best case". Hvis der derud over også var mange af forsinkelserne, som forplantede sig ud i netværket til de andre flyvninger, ville situationer være endnu værre.

Resultatet for SAS TOTAL i bedste fald, er en dag med *høj* forstyrrelser. Det er ikke nødvendigt med gisninger om resten af flyvningerne.

Andelen af aflysninger, er den eneste som falder udenfor og er faktisk tættere på *lav* forstyrrelse. Dog kan forplantede forstyrrelser, og kapacitetsbegrænsning i de andre lufthavne, have ført til aflysninger af de resterende SAS flyvninger. På de tre andre punkter, er situationen en smule værre end *høj* forstyrrelse. Dette er i bedste fald, så dagen var

	SAS CPH		Resterende	SAS TOTAL
	Afgange	Ankomster	Ankomster	Samlet
Planlagt	81	91	252	424
15OTP	3	8	252	263
% af operationer	3,8%	9,2%	100%	63,1%
% af planlagte	7,4%	13,2%	100%	63,7%
45FD	54	55	0	109
% af operationer	69,2%	63,2%	0%	26,1%
% af planlagte	66,7%	60,4%	0%	25,7%
Aflysninger:	3	4	0	7
% af planlagte	3,7%	4,4%	0%	4,1%
Gns. forsinkelse i min.	63,9	76,3	0	27,9

Tabel 5.11: UDREGNING AF FLYVNINGER DEN 23. DECEMBER 2010 FOR SAS TOTAL.

Forstyrrelse		Testdag: <i>høj</i>	23/12-10 SAS TOTAL BC
15OTP	↓	64,0%	63,1%
45FD	↑	21,6%	26,1%
Procent af aflyste fly	↑	5,6%	1,7%
Gns. forsinkelse i min.	↑	26,9	27,9

Tabel 5.12: DATA FRA DEN 23. DECEMBER 2010, CPH OG SAS.

sandsynligvis med endnu højere forstyrrelse.

Alle flyvninger blev gennemført fra SAS undtagen syv som var til og fra enten Paris eller Bruxelles. Begge de steder havde også problemer med vintervejret og årsagen til aflysning kan være udelukkende af den grund. Det kan eksempelvis være, fordi der var store forsinkelser, lufthavnen var lukket eller for at undgå at fly og mandskab strandede i en af de to lufthavne. Hvis alle aflysningerne var på grund af kapacitetsbegrænsning i andre lufthavne, har det måske ikke været muligt at reducere antallet.

Den gennemsnitlige forsinkelse både på ankomster og afgang i Københavns lufthavn var på over en time. Her kan modellen hjælpe, med at træffe beslutningerne på baggrund af den samlede omkostning ved forsinkelser. Både med kapacitetsbegrænsning, som ekstra bibetingelse i modellen, og uden.

Uden kapacitetsbegrænsning, opdateres systemet bare som normalt. Færre flyvninger bliver gennemført i hver periode i forhold til den bedste løsning fundet i perioden før.

Ved at lægge forsinkelser i minutter, til den planlagte afgangs- og ankomsttid, er det faktiske tidspunkt udregnet. I tabel 5.13 ses de 21 SAS operationer, igennem Kastrup, som blev gennemført fra klokken 7 til 9.

På 18 timer fra klokken 6 til 24 er 172 operationer planlagt, svarende til 9,5 flyvninger i timen. Den travleste periode er mellem klokken 7 og 9, hvor 17 operationer var planlagt hver time, næsten det dobbelte af gennemsnittet. Knap 20% af dagens operationer er planlagt på de to timer. Mellem klokken 7 og 8 var fire afgang og 13 ankomster planlagt.

Retning	Rute	Forventet	Gen. fors.	Rettidig %	Tidspunkt
Fra CPH	SK1205	07:05	6	100	07:11
Til CPH	SK743	07:05	14	100	07:19
Til CPH	SK2749	07:00	23	0	07:23
Til CPH	SK2885	07:15	11	100	07:26
Til CPH	SK1758	07:20	14	100	07:34
Til CPH	SK910	07:10	33	0	07:43
Til CPH	SK1461	07:25	21	0	07:46
Til CPH	SK1871	07:15	33	0	07:48
Til CPH	SK2861	07:20	31	0	07:51
Til CPH	SK1439	07:25	32	0	07:57
Til CPH	SK648	07:25	33	0	07:58
Fra CPH	SK501	07:45	22	0	08:07
Til CPH	SK1202	07:55	18	0	08:13
Til CPH	SK1415	07:25	55	0	08:20
Fra CPH	SK601	07:55	48	0	08:43
Fra CPH	SK434	08:10	34	0	08:44
Til CPH	SK668	08:30	14	100	08:44
Til CPH	SK1242	07:40	66	0	08:46
Fra CPH	SK1870	08:10	41	0	08:51
Til CPH	SK1463	08:20	35	0	08:55
Fra CPH	SK1243	08:00	58	0	08:58

Tabel 5.13: GENNEMFØRTE OPERATIONER I KØBENHAVNS LUFTHAVN FRA KL. 7-9. *Afgangene fra Københavns Lufthavn er markeret med grøn.*

Kun 11 af disse operationer blev gennemført. 1 det første kvarter, 3 det næste kvarter, 2 det tredje kvarter og 5 det sidste kvarter. Endnu værre var det mellem klokken 8 og 9 hvor kun 10 blev gennemført og halvdelen af dem var fra foregående time.

Flynumrenes planlagte afgang og ankomsttid for resten af december tjekkes. Alle tre aflyste flyvninger, fra Københavns Lufthavn, er planlagt efter klokken 15 og alle fire planlagte ankomster var efter klokken 19. Test af modellen ved *høj* forstyrrelse viste, at aflysninger tidligere på dagen i gennemsnit gav forbedring. Hvis det var muligt at ændre på hvilke flyvninger som blev aflyst, ville der måske være en forbedring i tidligere aflysninger eller måske at undgå aflysninger ved indsættelse af reservemandskab og fly.

Hvis forsinkede passagerer, ikke har tilstrækkelig transittid til at nå den næste flyvning, vil modellen i begge tilfælde give en senere afgangstid på næste flyvning. -Hvis omkostningen ved dette er mindre. For en enkelt passager, vil en lang forsinkelse af næste flyvning, måske ikke kunne opvejes af besparelsen ved at undgå at denne passager bliver forstyrret.

Når mindst 26,1% af alle flyvninger er forsinket mere end 45 minutter, kan der være et stort antal passagerer med tilslutningsrejseplaner, som ikke når næste flyvning. SAS TOTAL har, som nævnt tidligere, en større hyppighed af tilslutningsrejseplaner, hvor alle flyvningerne udelukkende opereres af SAS TOTAL. Forsinkelserne i Københavns Luft-

havn, fortsatte hele dagen, så hvis nogle af de sene flyvninger havde passagerer som skulle videre med andre fly i Oslo eller Stockholm, kunne det føre til forstyrrede passagerer. Selvom forstyrrede passagerer er angivet således, uanset om de ombookes eller ej, vil sent forstyrrede passagerer hyppigere føre til omkostninger til overnatninger end de tidligt forstyrrede passagerer.

Her kunne det være en mulighed, at holde nogle flyvninger tilbage, for at undgå forstyrrede passagerer. Forsinkelsesomkostningerne, ville blive højere for samme flyvning, og det kunne endda blive nødvendigt at indsætte et reservemandskab. -Hvis forsinkelsen ville føre til en overtrædelse af arbejdsregler. Så længe omkostningerne ved forstyrrelse overstiger forsinkelses-omkostningerne, vil det være mere optimalt at holde en flyvning tilbage.

Ved kapacitetsbegrænsning i modellen: Når kapacitetsbegrænsningen bliver tilføjet og sættes til eksemplevis et fast antal flyvninger hvert kvarter, giver løsningen de flyvninger som er mest optimale at gennemføre i tidsperioden.

Begrænsningen på afgang vil føre til, at flyvninger bliver forsinkede, da de ikke kan afgå på det planlagte tidspunkt. En begrænsning på ankomster vil gøre, at flyvninger bliver holdt tilbage fra de andre lufthavne. I begge tilfælde vil det øge omkostningen til mandskab og muligvis føre til forsinkelses omkostninger for passagerer og endda forstyrrede passagerer.

Når modellen løses med bibetingelsen, vil afgangstidspunkterne fastsættes således, at det giver den mindste samlede omkostning. Det er for både mandskab, fly og passagerer.

Flyvning SK1416 fra Københavns Lufthavn til Stockholm var planlagt til klokken 8.10 og var 114 minutter forsinket. Se tabel 5.14.

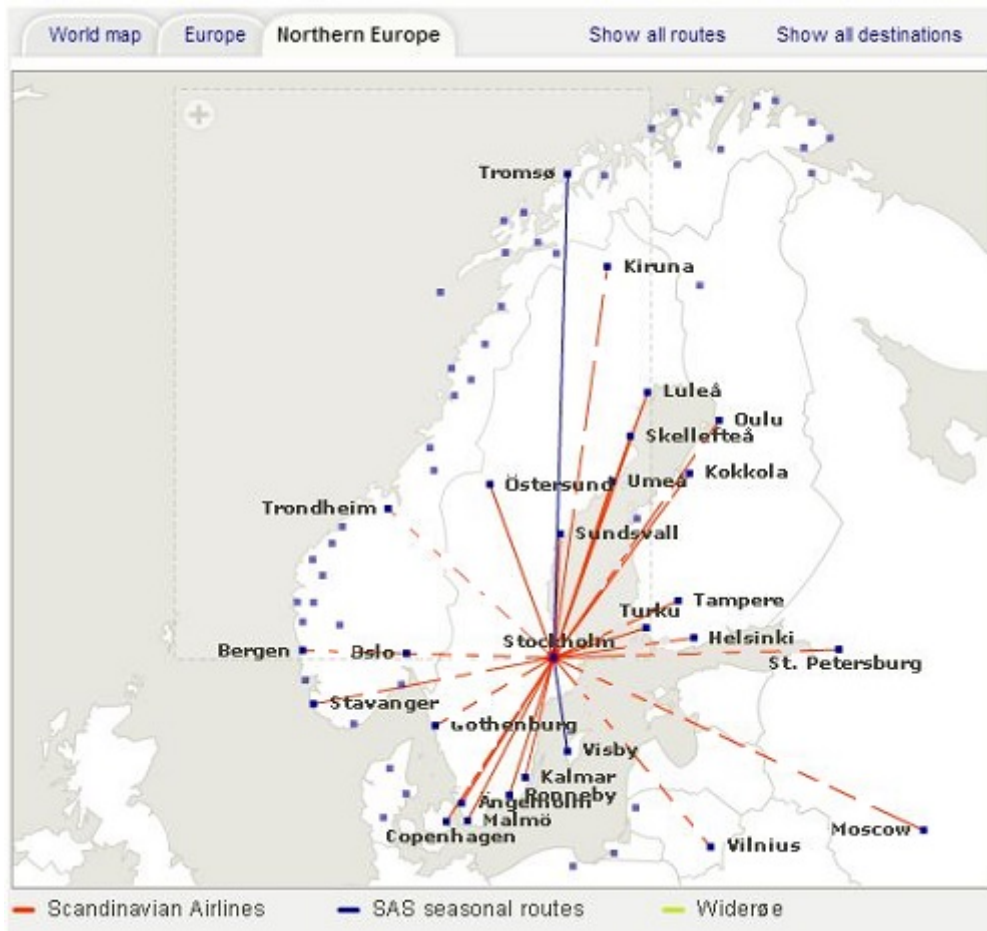
Til	Rute	Plan	Forsinkelse	Afgang	Ved ombytning	
					Forsinkelse	Afgang
Stockholm	SK1416	08:10	01:54	10:04	00:33	08:43
Zürich	SK601	07:55	00:48	08:43	02:09	10:04

Tabel 5.14: TO FLYVNINGER FRA KØBENHAVNS LUFTHAVN

Hvis flere passagerer på denne flyvning, skulle tilslutte til andre flyvninger i Stockholm, kunne det være en fordel at den afgik kl. 8.43 i stedet for SK601 til Zürich. Med en forsinkelse på blot 33 minutter kunne passagerne måske nå deres respektive næste flyvning, især hvis disse afgang blev udsat hvis nødvendigt. I figur 5.3 ses strækningerne til og fra Stockholm. De stiplede linjer er ruter mellem Stockholm og sekundære lufthavne, hvor direkte ruter til og fra København er mulige. De fuldt optrukne, er dermed mulige ruter med tilslutninger i Stockholm til og fra København.

Eksempelvis, kan billetter fra København til Kokkola-Pietarsaari bestilles til fredag den 28. juni, bestående af SK1416 fra København klokken 8.10 til Stockholm klokken 9.20 og fra Stockholm klokken 11:35 med SK4214 til destinationen.

Hvis der var passagerer på tilsvarende rejseplan den 23. december 2010 og flyet stadig var knap to timer forsinket og ankom i Stockholm klokken 11:14 ville en tilslutning skulle nås på 21 minutter. Det er halvdelen af typiske anbefalinger på mellem 40 og 45



Figur 5.3: DESTINATIONER I SAS FRA STOCKHOLM TIL NORDEUROPA
Fra sasgroup.net

minutter. Med planmæssig afgang af næste flyvning, ville passagererne sandsynligvis blive forstyrrede.

Der er flere byer i Sverige, som heller ikke har direkte ruter til og fra København, hvor samme situation kunne opstå.

Ved en lavere forsinkelse, vil forsinkelses omkostningerne, også blive reduceret for flyvning SK1416.

Afgangen til Zürich var planlagt til kl. 7.55 og ville blive over to timer forsinket som følge af dette. Det kan give en øget forsinkelsesomkostning af mandskab, fly og passagerer. Endvidere kan det øge risikoen for at mandskabet eksempelvis ikke kan nå næste flyvning til tiden. Men forsinkelsen kunne også føre til at passagerer, som skulle tilslutte fra en tidligere forsinket flyvning i København, nåede flyet til Zürich.

Hvis den samlede omkostning ved ombytning var lavere end uden, ville det være en forbedring at lade flyet til Stockholm afgå først.

Til gengæld kan flere aflysninger måske være en mulighed. Da der sjældent er flyvninger uden passagerer, vil det i langt de fleste tilfælde resultere i forstyrrede passagerer. Men når der er forsinkelser på næsten alle afgang, vil antallet af forstyrrede passagerer alligevel

stige. En aflysning, kan give plads til at de efterfølgende flyvninger gennemføres tidligere.

Hvis flere af de forstyrrede ved aflysning også kan ombookes, bliver den realiserede omkostning endda også mindre.

En flyvning forsinket så meget, at alle forsinkelsesomkostningerne sammenlagt, er ligeså høje som forstyrrelsesomkostningerne for passagererne, vil måske være bedre at aflyse. Det kunne eksempelvis være, hvis en flyvning med få passagerer var forsinket i så mange timer, at omkostning til mandskab og fly oversteg differencen mellem forsinkede og forstyrrede passagerer.

På denne dag kan der være en fordel i at ændre rækkefølgen af flyvningerne, hvis muligt, således at flere passagerer når deres tilslutninger og ikke bliver forstyrrede. Flyvninger kan også holdes tilbage i stedet, således at passagerer forsinkede på første flyvning, ikke kommer for sent til næste flyvning.

Kombinationen af disse muligheder kan give en bedre løsning over hele netværket.

Det kan være en fordel at ændre på hvilke flyvninger som aflyses, eller endda aflyse færre flyvninger. Indsættelse af reservemandskab og fly kan være en hjælp her.

Ved kapacitetsbegrænsning kan forsinkelsesomkostninger ikke undgås, men de kan minimeres, ved at de bedste beslutninger træffes angående flyvningerne.

Kapacitetsbegrænsningen kan være svær at bruge i virkelige situationer. Den bedste løsning for netværket afhænger af valgt truffet og begrænsningerne. Hvis begrænsningerne ændrer sig, ville løsningerne i sidste periode måske være anderledes.

Ombytning af tider for operationer i forbindelse med kapacitetsbegrænsning, er kun muligt hvis flyselskabet bliver tildelt en række tider, som de selv kan disponeres over. Hvis tider bliver tildelt flyvninger, så skal der laves aftaler om hvorvidt de kan byttes og ændres.

Der er også problemet med når flyene fysisk står i kø til af-isning. Det kan være svært at vide hvor mange flyvninger, der i hver periode er mulige at sende afsted fra lufthavnen. Flyene må derfor bare sendes i køen på bedste vis.

Til det kan en mulighed også være at aflyse flere flyvninger. Kapacitetsbegrænsningen i lufthavnen gør, at der er flere planlagte operationer end der kan gennemføres i nogle tidsperioder. Operationerne skal så planlægges så omkostningerne minimeres og det kan hænde at en eller flere flyvninger, bliver forsinket i meget lang tid, da der er flere flyvninger som skal prioriteres først. Eksempelvis kunne en flyvning, udelukkende med forstyrrede tilslutningspassagerer, lige så vel være aflyst, da forsinkelsesomkostningerne til fly og mandskab ville blive sparet.

SAS TOTAL: Vintervejr CPH 9/12-12

Situationen i Københavns Lufthavn den 9. december 2012, som både indeholdt snefald og en uheldig vindretning, er et godt tilfælde med varierende kapacitet. Gennemsnitligt starter fly i modvind.

Resultatet i Københavns Lufthavn, for den 9. december 2012 fremgår af table 5.15.

Da Københavns Lufthavn, i 2012 i gennemsnit håndterede 35,1% af flyvninger fra SAS AB kunne forstyrrelsen ramme et mellem antal flyvninger i SAS TOTAL. Her er antagel-

Den 9. december 2012							
CPH	Rute	Gennemført	Aflyste	Gns.fors.	Rettidig	Planlagt	I alt
Fra	Total	121	20	39	36%	141	} 261
Til	Total	103	17	45	30%	120	

Tabel 5.15: DATAUDTRÆK FOR 9. DECEMBER 2012, CPH OG SAS.

sen igen, at samme andel af flyvninger var gennem Københavns Lufthavn den 9 december 2012. Dermed havde SAS TOTAL 743 flyvninger i alt. De udregnede værdier for dagen ses i tabel 5.16.

	SAS CPH		Resterende	SAS TOTAL
	Afgange	Ankomster	Ankomster	Samlet
Planlagt	141	120	482	743
15OTP	31	19	482	532
% af operationer	25,6%	18,4%	100%	75,3%
% af planlagte	36,2%	30,0%	100%	76,6%
45FD	52	52	0	104
% af operationer	43,0%	50,5%	0%	14,7%
% af planlagte	36,9%	43,3%	0%	14,0%
Aflysninger:	20	17	0	37
% af planlagte	5,0%	11,7%	0%	5,0%
Gns. forsinkelse i min.	46,1	53,6	0	15,7

Tabel 5.16: UDREGNING AF FLYVNINGER DEN 9. DECEMBER 2012 FOR SAS TOTAL.

Her er de resterende flyvninger igen blevet sat til best case. Afgangene bliver brugt som ankomststatistik for ankomster til destinationen.

Tabel 5.17 viser SAS CPH og SAS TOTAL BC, hvor ingen af de resterende 482 flyvninger ankom et sekund for sent eller blev aflyst.

Forstyrrelse		Testdag:	Best Case	
		<i>mellem</i>	SAS CPH	SAS TOTAL
15OTP	↓	71,6%	33,3%	75,3%
45FD	↑	11,4%	39,8%	14,7%
Procent af aflyste fly	↑	2,7%	14,2%	5,0%
Gns. forsinkelse i min.	↑	13,8	49,5	15,7

Tabel 5.17: DATA FRA DEN 9. DECEMBER 2012, CPH OG SAS.

Bortset fra andelen af aflyste fly, som er præcis værdien for *høj* forstyrrelse, så er SAS TOTAL kun med *mellem* forstyrrelse, hvis det antages at ingen af forstyrrelserne forplanter sig. Det betyder heldigvis, at vejret ikke gav lige så stor forstyrrelse som man kunne frygte. Men som beskrevet tidligere på side 11 vendte vinden i løbet af eftermiddagen. Kapaciteten blev øget og omfanget af aflysninger og forsinkelser faldt. Hvis dagen var

startet og havde fortsat på samme vis, havde udfaldet blevet anderledes.

Ligesom med kapacitetsbegrænsningen ved den 23. december 2010, er det her en fordel at indsætte den ekstra bibetingelse i modellen. Her er det kun nødvendigt at have bibetingelser for de tidsperioder, hvor der er en begrænsning. Hvor begrænsningen den 23. december kan have været konstant, dog ikke nødvendigvis med samme antal flyvninger for SAS TOTAL per tidsperiode, kan det her variere.

Problemet med den varierende kapacitet er, at den bedste løsning for en periode, kan være forskellig, fra en løsning med en ændret kapacitetsbegrænsning senere. Den bedste fremgangsmåde er umiddelbart, at bibetingelsen for kapacitetsbegrænsning følger prognosen for vejsituationen. Hvis der sker ændringer i kapaciteten fra dem sat i modellen er det en fordel at køre modellen igen.

De fleste aflysninger har kun en enkelt planlagt tid. Men nogle har flere forskellige planlagte tidspunkter i løbet af hele december. Eksempelvis, har SK763 både været planlagt til kl. 11:15 og kl. 18:55. Oversigt over alle 37 aflysninger findes i bilag 8 på side 94.

Fra klokken 12 indtil klokken 19, er mindst 126 operationer planlagt og heraf er 23 af dem aflyst. Tre af aflysningerne er ikke talt med, da de også har andre planlagte tidspunkter. Det er også i denne periode lufthavnen var ramt af sidevind som gjorde, at kun tværbanen kunne bruges. Aflysningerne svarer til 18,3% af de planlagte operationer igennem Københavns Lufthavn i tidsperioden. Hvis de tre uvisse aflysninger også var i denne periode, ville det være 20,2% af de planlagte operationer.

At perioden med de fleste aflysninger var midt på dagen, tyder på det primært var på grund af vinden. Når problemet først opstod senere kan aflysninger og forsinkelser ikke forhindres ved en ændring af de tidligere flyvninger.

Modellen kan hjælpe med at reducere omkostningen til forstyrrede og forsinkede passagerer, eksempelvis ved at ændre på hvilke af flyvningerne som skal aflyses. I testen af modellen, var de aflyste flyvninger med færre passagerer i gennemsnit.

I SAS TOTAL er der mindst tre mandskabsbaser. Her vil indsættelse af reservemandskab være en mulighed til, at reducere antallet af aflysninger som ikke er på grund af kapacitetsbegrænsningen.

Når der er tre hovedlufthavne giver det mulighed for mange flere destinationer. Dermed også muligheden for flere tilslutningsrejseplaner. Løsning af modellen kan så give eventuelle flyvninger, som skal holdes tilbage, når det er fordelagtigt at vente på tilsluttende passagerer. Dette vil typisk give en forsinkelses-omkostning til mandskab, fly og de andre passagerer på flyvningen. Når denne er mindre, end omkostningen ved de forstyrrede passagerer, som ikke når flyvningen, er det bedst at holde den tilbage.

Omvendt kan nogle forsinkelser også undgås, ved at indsætte reservemandskab og fly, de steder det er muligt. Så kunne flyvninger, som ellers var forsinkede, afgå tidligere og det kunne reducere antallet af passagerer som ikke nåede sin tilslutning.

Flyvning SK1421 fra Stockholm var planlagt til at ankomme kl. 13.30. SK1422 fra København til Stockholm er planlagt 45 minutter senere. Hvis samme mandskab og fly opererede de to flyvninger og mandskabet eksempelvis skulle have 45 minutter imellem

flyvningerne, ville en 32 minutters forsinket ankomst til Københavns Lufthavn også give en forsinket afgang. Afgang fra Københavns lufthavn er 52 minutter forsinket.

Hvis flere af passagererne, på flyvning SK1422 til Stockholm, skulle tilslutte til en anden flyvning der, vil forsinkelsen på knap en time måske føre til forstyrrede passagerer. Hvis et reservemandskab indsættes og SK1422 afgik tidligere kunne dette undgås.

I *mellem* forstyrrelse blev forstyrrede passagerer, som ikke nået deres tilslutning reduceret med 36,7%.

Ved kapacitetsbegrænsning i modellen: Under kapacitetsbegrænsningen kan kun et hvis antal operationer gennemføres. Rækkefølgen af disse gennemførte flyvninger kan være til meget forskellig omkostning. Ved at minimere driftomkostningerne plus omkostningerne for passagerer ved forstyrrelse og forsinkelse, kan flyvningerne prioriteres bedst muligt.

Fire afgange var eksempelvis planlagt til kl. 14.15, SK649 blev kun 17 minutter forsinket og den mest forsinkede med 52 minutter var SK1422 til Stockholm, som nævnt ovenfor.

Der kan være stor forskel på omkostningen ved at forsinke hver af de fire flyvninger mellem 17 og 52 minutter. Den mindst forsinkede kan være uden tilslutningspassagerer og den til Stockholm kan med sin lange forsinkelse måske forhindre nogle tilslutninger.

Hvis det allerede er en fordel at indsætte reservemandskab på flyvningen fra København til Stockholm, kan der være en fordel mere i at udsætte den foregående flyvningen fra Stockholm til København. Hvis den først ankommer senere, kan det give plads til andre flyvninger. Alle flyvningerne efter kan rykkes til en tidligere tid indtil SK1421 lander. Da der kan være forskel på antallet af operationer som må gennemføres samtidig på en bane, er tabel 5.18 kun med de fem ankomster mellem 14:02-15:27. SK1469 også i samme periode, men er ikke med i ombytningen da den først var planlagt til kl. 14:55.

					Ved ombytning	
Fra	Rute	Planlagt	Fors.	Ank.	Fors.	Ank.
Oslo, Norge	SK1467	13:40	00:26	14:06	00:22	14:02
Helsinki, Finland	SK1717	13:35	00:33	14:08	00:31	14:06
Milano, Italien	SK1686	13:20	00:52	14:12	00:48	14:08
Turku, Finland	SK2713	13:35	01:52	15:27	00:37	14:12
Stockholm, Sverige	SK1421	13:30	00:32	14:02	01:57	15:27

Tabel 5.18: FEM FLYVNINGER TIL KØBENHAVNS LUFTHAVN

SK2713, fra Turku i Finland, ankom i Københavns Lufthavn 1 time og 52 minutter forsinket. I tabel 5.18, ses det den ved ombytning nu kun er 37 minutter forsinket. En time kan være afgørende for, om passagerer kan nå næste flyvning.

Flyvninger fra Turku kan ofte have tilslutningspassagerer, da der ikke er mange destinationer fra Turku³. Se de mulige destinationer i figur 5.4. En rejseplan til Heathrow, er mulig med tilslutning igennem eksempelvis Københavns Lufthavn.

³ifølge Finavia tidl. Finnish Civil Aviation Administration



Figur 5.4: DESTINATIONER FRA TURKU
Fra finavia.fi

SK505 fra Københavns Lufthavn til Heathrow var planlagt til klokken 14:50 og afgik klokken 15:17, 10 minutter før SK2713 fra Turku landede. Hvis der var tilslutningspassagerer den dag, ville de blive forstyrrede. Ved en ombytning, ville en tilslutning være mulig selv med en forsinkelse på 37 minutter.

Kapacitetsbegrænsning på ankomster kan også være lidt vanskelige, da kapacitetsbegrænsning kunne blive indført efter flyvningerne er påbegyndt. Hvis begrænsningen allerede var i kraft inden, kunne nogle af flyvningerne holdes tilbage, hvis andre var vigtigere.

Ligesom tidligere gælder det stadig, at en ændring af hvilke flyvninger som er aflyst, kan reducere omkostning og antallet af forstyrrede passagerer. Antallet af aflysninger kan også reduceres, med samme formål, medmindre det er på grund af kapacitetsbegrænsning.

Forpassede tilslutninger kan i højere grad undgås, enten ved forsinkelse af sidste flyvning i en rejseplan eller mindre forsinkelse af første hvor muligt flyvning.

Den store fordel er igen ved mulighed for bibetingelsen med kapacitetsbegrænsning. Her vil det fremgå hvilke flyvninger som skal prioriteres, når ikke alle operationer kan gennemføres på visse tidspunkter.

5.5 Opsamling af recovery

I recovery skulle planen genoprettes hurtigst muligt uden for mange forstyrrelser. Det vigtigste her var at en genopretningsløsning skulle findes på kort tid, da der ellers var risiko for den var uopnåelig. Genopretning foregik i samme rækkefølge som under planlægning, først fly og dernæst mandskab.

Litteratur angående Passenger Recovery Problemet blev gennemgået og en integreret model DPM, blev valgt af Bratu & Barnhart som passager genopretnings modellen.

Den genoprettede flybalancen på en dag med hensyn til driftsomkostningerne for fly og mandskab og passageromkostninger.

Regularitetsstatistik, for SAS flyvninger igennem Københavns Lufthavn, på fire forskellige dage med potentiel forstyrrelse, blev gennemgået. Disse blev analyseret og sammenlignet med egenskaber og resultater af DPM modellen, ud fra fastsatte forudsætninger.

6 Konklusion

Det kan konkluderes, at der er mulighed for at genoprette for passagerer på bedre vis, ved at minimere den samlede omkostning, ikke blot af driftsomkostningerne men også passageromkostningerne.

Gennemgangen af DPM modellen og resultaterne i artiklen, viser at den er hurtig nok til at blive brugt i virkelige beslutningssituationer. Da den er baseret på flåde tildelingsmodellen, genoprettes fly først ligesom den typiske fremgangsmåde, men passager og driftsomkostninger til mandskab bliver også inkluderet. Minimering af alle tre omkostninger samlet, giver et bedre grundlag at træffe beslutninger på.

Den konklusion er baseret på gennemgangen af DPM modellen og analyse af regularitetsstatistik for dagene i de fire eksempler. Dette er ud fra de vigtigste forudsætninger, som at dagene var med genopretningen af passagerer til sidst, at samme muligheder for genopretning var mulig og at modellen kunne implementeres og løses på mindst lige så kort tid.

Da det ved de større forstyrrelser, ikke nødvendigvis har været muligt at ændre på aflysningerne, kan den største fordel have været modellens egenskab, til at fremme tilslutninger, ved at udsætte nogle afgange og reducere forsinkelsen på andre.

Endvidere vil kapacitetsbegrænsningen i modellen være et ekstra hjælpemiddel i de situationer, hvor det er begrænset, hvor mange af de planlagte flyvninger som må gennemføres. I de tilfælde, hvor det er muligt at implementere den i modellen uden længere løsnings tid og hvor antallet af tilladte flyvninger i perioden er kendt, inden kørsel af modellen.

Litteratur

- [1] Ahmed Abdelghany, Goutham Ekollu, Ram Narasimhan & Khaled Abdelghany, “A proactive crew recovery decision support tool for commercial airlines during irregular operations”. *Annals of Operations Research*, 2004.
- [2] Khaled F. Abdelghany, Ahmed F. Abdelghany & Goutham Ekollu, “An integrated decision support tool for airlines schedule recovery during irregular operations”. *European Journal of Operational Research*, 2008.
- [3] M. Reza Abdi & Sanjay Sharma, “Information system for flight disruption management”. *International Journal of Information Management*, 2008.
- [4] Shervin AhmadBeygi, Amy Cohn, Yihan Guan & Peter Belobaba, “Analysis of the potential for delay propagation in passenger airline networks”. *Journal of Air Transport Management*, 2008.
- [5] John Balfour, “Volcanic ash and closure of airspace - airlines’ obligations under EU Regulation 261/2004 (Part 1)”. *Mondaq*, 2010.
- [6] Cynthia Barnhart, Amy M. Cohn, Ellis L. Johnson, Diego Klabjan, George L. Nemhauser & Pamela H. Vance, “Airline Crew Scheduling” kapitel 14 i “Handbook of Transportation Science”. *Kluwer Academic Publishers*, 2003.
- [7] David Begg, James Cherry, Ben DeCosta, Josef Felder, Sir Malcolm Field, Jim Hunter, m.fl, “Report of the Heathrow winter resilience enquiry”. Rapport udgivet på foranledning af BAA, 2011.
- [8] Eric S. Blake, Christopher W. Landsea & Ethan J. Gibney “The deadliest, costliest, and most intense United States Tropical cyclones from 1851 to 2010” <http://www.nhc.noaa.gov> 2011.
- [9] Stephane Bratu & Cynthia Barnhart, “Flight operations recovery. New approaches considering passenger recovery”. *Journal of Scheduling*, 2006.
- [10] Edmund K. Burke, Patrick De Causmaecker, Geert De Maere, Jeroen Mulder, Marc Paelinck & G V Berghe, “A multi-objective approach for robust airline scheduling”. *Computers & Operations Research*, 2010.
- [11] Jens Clausen, Allan Larsen, Jesper Larsen & Natalia J. Rezanova, “Disruption management in the airline industry - Concepts, models and methods”. *Computers & Operations Research*, 2010.
- [12] Mark Eddington, John Keahey & Joe Baird “Stranded Travelers Fill Salt Lake Hotels”. *The Salt Lake Tribune*, 12 September 2001.
- [13] N. Eggenberg, M. Salani & M. Bierlaire, “Constraint-specific recovery network for solving airline recovery problems”. *Computers & Operations Research*, 2009.

- [14] J. A. Filar, P. Manyem & K. White, “How Airlines and Airports Recover from Schedule Perturbations: A Survey”. *Annals of Operations Research*, 2001.
- [15] Michel Gamache, François Soumis, Gérald Marquis & Jacques Desrosiers, “A column generation approach for large-scale aircrew rostering problems”. *Operations Research*, 1999.
- [16] Marianne Guffanti, Gari C. Mayberry, Thomas J. Casadevall & Richard Wunderman, “Volcanic hazards to airports”. *Natural Hazards*, 2009.
- [17] Yufeng Guo, Taïeb Mellouli, Leena Suhl & Markus P. Thiel, “A partially integrated airline crew scheduling approach with time-dependent crew capacities and multiple home bases”. *European Journal of Operational Research*, 2005.
- [18] Christopher A. Hane, Cynthia Barnhart, Ellis L. Johnson, Roy E. Marsten, George L. Nemhauser & Gabriele Sigismondi, “The fleet assignment problem: Solving a large-scale integer program”. *Mathematical Programming*, 1995.
- [19] Holger Hättig & Sebastian Hollmeier, “Airline strategy in the 2001-2002 crisis - the Lufthansa example”. *Air Transport Management*, 2003.
- [20] N. Jafari & S. H. Zegordi, “Simultaneous recovery model for aircraft and passengers”. *Journal of the Franklin Institute*, 2010.
- [21] Niklas Kohl, Allan Larsen, Jesper Larsen, Alex Ross & Sergey Tiourine, “Airline disruption management - Perspectives, experiences and outlook”. *Journal of air transport management*, 2007.
- [22] Shan Lan, John-Paul Clarke & Cynthia Barnhart, “Planning for robust airline operations: Optimizing aircraft routings and flight departure times to minimize passenger disruptions”. *Transportation Science*, 2006.
- [23] Baerbel Langmann, Arnau Folch, Martin Hensch & Volker Matthias, “Volcanic ash over Europe during the eruption of Eyjafjallajökull on Iceland, April-May 2010”. *Atmospheric Environment*, 2011.
- [24] L. Lettovsky, “Airline operations recovery: an optimization approach”. *PhD Thesis*, 1997.
- [25] Claude P. Medard & Nidhi Sawhney, “Airline crew scheduling from planning to operations”. *European Journal of Operational Research*, 2006.
- [26] Rico Merkert & Luca Mangia, “Management of airports in extreme winter conditions - some lessons from analysing the efficiency of Norwegian airports”. *Research in Transportation Business & Management*, 2012.
- [27] Servel A. Miller, “April 2010 UK Airspace closure: Experience and impact on the UK’s air-travelling public and implications for future travel”. *Journal of Air Transport Management*, 2011.

- [28] Rüdiger Nissen & Knut Haase, “Duty-period-based network model for crew rescheduling in European airlines”. Springer science, 2006.
- [29] Tamara Pejovic, Robert B. Noland, Victoria Williams & Ralf Toumi “A tentative analysis of the impacts of an airport closure”. Journal of Air Transport Management, 2009.
- [30] Bill Read, “Under the ash cloud”. Aerospace International, 2011.
- [31] Jay M. Rosenberger, Ellis L. Johnson & George L. Nemhauser, “Rerouting Aircraft for Airline Recovery”. Transportation Science, 2003.
- [32] Jay M. Rosenberger, Andrew J. Schaefer, David Goldsman, Ellis L. Johnson, Anton J. Kleywegt & George L. Nemhauser, “A stochastic Model of Airline Operations”. Transportation Science, 2002.
- [33] Nicholas G. Rupp, George M. Holmes & Jeff DeSimone, “Airline Schedule Recovery after Airport Closures, Empirical Evidence Since September 11th”. Working paper 9744, 2003.
- [34] Hanif D. Sherali, Ebru K. Bish & Xiaomei Zhu, “Airline fleet assignment concepts, models, and algorithms”. European Journal of Operational Research, 2005.
- [35] Oliver Weide, David Ryan & Matthias Ehrgott, “An iterative approach to robust and integrated aircraft routing and crew scheduling”. Computers & Operations Research, 2009.
- [36] Gang Yu, Michael Argüello, Gao Song, Sandra M. McCowan & Anna White, “A New Era for Crew Recovery at Continental Airlines”. Interfaces, 2003.

Bilag 1

Strandede passagerer vil altid være forstyrrede passagerer. Ved Eyjafjallajökull var estimeret 7 millioner passagerer var strandede, ifølge Read [30]. Men forstyrrede passagerer som blev forstyrrede inden de kom til lufthavnen vil ikke være strandede. Fra tabellen 3.3 er det samlede antal aflyste flyvninger, mellem 15. og 23. april, fra og til Kastrup hhv. 2047 og 2069.

Københavns lufthavn havde i 2010 i gennemsnit 88 passagerer pr. fly baseret på det totale antal passagerer og flyvninger.¹ Dog kan det ikke udelukkes at antal passagerer pr. fly for 2010 er påvirket af askeskyen. Der kan både være færre passagerer på flyene efter askeskyen fordi de har udskudt/aflyst deres rejse. Der kan også være flere passagerer, da nogle kan have blevet ombooket til et senere fly, som dermed har et højere passager antal end normalt, men stadig samme antal flyvninger. I 2009 og 2011 var der hhv. 83 og 90 per fly så de 88 er ikke urealistiske.

Med 88 passagerer per flyvning vil de 2047 aflyste fly svare til mindst 170.000 forstyrrede passagerer som skulle fra Kastrup i perioden. Se tabel 1

	Passagerer	Flyvninger	Per fly	Strandede i Kastrup	Strandede i alt
Estimat Read	7.000.000	100.000	70	143.290	288.120
CPH 2009	19.715.451	236.172	83	170.882	343.600
CPH 2010	21.501.750	245.640	88	179.181	360.288
CPH 2011	22.725.517	253.762	90	183.318	368.606

Tabel 1: Bud på antal passagerer med aflyst fly fra og til Kastrup fra 15.-23. april

Ikke alle disse passagerer med aflyste fly var nødvendigvis strandede, som sådan, over perioden. Nogle af passagererne rejsende fra Københavns Lufthavn må antages at bo i Danmark. Hvis nogle af dem, valgte ikke møde op i Lufthavnen de dage den var lukket, eller hvis herboende ikke blev talt med i antal strandede, bliver antal strandede passagerer lavere. Hvis det antages at estimatet fra Read [30] også gjaldt for passagerer strandede i Kastrup, vil det betyde at omkring 143.000 var strandede i Kastrup hen over perioden.

Københavns Lufthavn vurderer selv at der på grund af askeskyen gik omkring 350.000 færre passagerer igennem lufthavnen. Hvilket også svarer nogenlunde til 4116 aflyste flyvninger med mellem 83 og 88 passagerer i gennemsnit, dvs mellem 343.600 og 360.288.

Der er mindst tre mulige årsager til hvorfor der var færre passagerer i Københavns Lufthavn CPH som følge af askeskyen, dog er ikke alle forstyrrede passagerer. Til gengæld er der også mindst tre mulige tilfælde hvor forstyrrede passagerer vil indgå i antallet af passagerer som rejste igennem CPH.

Manglende passagerer i Københavns Lufthavn:

1. Forstyrrede passagerer med aflyste fly som ikke blev genbooket.

¹Trafikstatistik fra Københavns Lufthavne fra CPH.dk

2. Ikke-forstyrrede passagerer som selv annullerede/ændrede deres billet i april.
3. Mistede passagerer som *ville* have købt billet og rejst med fly under normale omstændigheder.

Forstyrrede passagerer i Københavns Lufthavn:

1. Ombookede passagerer som fik plads på et senere fly.
2. Ombookede passagerer med flyvninger igennem CPH hvor den oprindelige rejse ikke gik igennem CPH.
3. Passagerer som af andre grunde endte med at rejse igennem CPH.

De ovenstående seks punkter gør det vanskeligt at sætte tal på, præcis hvor mange passagerer der blev forstyrret, for eksempel i Kastrup. Kun flyselskaberne hver især ved hvor mange passagerer det drejer sig om. Men som udgangs punkt var der mindst 170.000 rejsende fra Kastrup som blev forstyrret under askeskyen.

Bilag 2

Variabler:

$a \in A$	Lufthavn a tilhører mængden af lufthavns beliggenhed A .
$A' \subseteq A$	Mængden af lufthavne med reserve mandskab.
$i \in I$	Flyvninger i fra mængden flyvninger I .
$k \in K$	Flåde type k fra mængden flåde type K .
$m \in M$	Mandskab m fra mængden mandskab M .
$r \in R$	passager rejseplaner r af mængden alle rejseplaner R .
$L \subseteq R$	delmængden L med lokale passager rejseplaner r kun indeholder en enkelt flyvning.
$C \subseteq R$	delmængden C med <i>connecting</i> passager rejseplaner r som indeholder mere end en enkelt flyvning.
	$L \cup C = R$ og $L \cap C = \emptyset$
$H(i)$	Sættet med kopier af alle flyvninger i .
$HT(r)$	Sættet med alle flyvninger i rejseplan r .
$VC(i, t)$	Af de planlagte tilsluttende fly afgang, er dette sæt afgang som ikke kan nås fra t 'te kopi af flyvning i .
$x_i^t = 1,$	hvis flyvning i er valgt til at afgå på den t 'te kopi af i og 0 ellers.
$z_i = 1,$	hvis flight leg i er aflyst, 0 ellers.
$y_t^{k,a}$	antallet af fly af type k i lufthavn a til tiden t .
$r_v^m = 1$	hvis det er nødvendigt at et reserve mandskab dækker den v 'te flyvning i i mandskab m 's plan ved aflysning og 0 ellers.
$q_v^m = 1$	hvis det er nødvendigt at et reserve mandskab dækker den v 'te flyvning i i mandskab m 's plan og 0 ellers.
$\lambda_r = 1$	hvis planlagte rejseplan r er forstyrret og 0 ellers.
$I_{n-}^{k,a}$	sættet af <i>flight arcs</i> for flåde type k som ankommer i knude n i lufthavn a .
$I_{n+}^{k,a}$	sættet af <i>flight arcs</i> for flåde type k som afgår fra knude n i lufthavn a .
b	den første knude altså det først punkt for recovery planlægnings perioden, tidspunktet for knuden er også b .
e	den sidste knude altså det sidste punkt for recovery planlægnings perioden, tidspunktet for knuden er også e .
$N(k, a)$	er sættet af noder med inflow og outflow af flytype k i lufthavn a
$N_b^{k,a}$	antallet af operationelle fly af type k i lufthavn a til tiden b .
$N_e^{k,a}$	antallet af operationelle fly af type k i lufthavn a til tiden e .
o_i^t	forsinkelses omkostningen fra fly og mandskab tildelt t 'te kopi af flyvning i
$I_{b+}^{k,a}$	er sættet af flyvnings kanter for flåde type k som angår fra knude b i lufthavn a .
$I_{e-}^{k,a}$	er sættet af flyvnings kanter for flåde type k som ankommer i knude e i lufthavn a .

$i_m(v)$	er det v 'te flyvning bemannet af mandskab m på den dag.
n_m	antallet af flyvninger i dutien tildelt mandskab m .
$V(m, v, t)$	er mængden af kopier af flyvninger $i_m(v+1)$, hvor mandskabet m enten har for lidt tid til nå fra den t 'te kopi af flyvning $i_m(v)$, eller ved at nå flyvningen overtræde arbejdsregler.
$H(i_m(v))$	sættet af kopier af flyvning $i_m(v)$.
c_r	er den estimerede omkostning per passager med rejseplan r .
$a1_m(v)$	den oprindelig lufthavn hvor v 'te afgang af flyvning $i_m(v)$ i mandskab m 's plan letter fra.
$a2_m(v)$	den lufthavn hvor v 'te afgang af flyvning $i_m(v)$ i mandskab m 's plan lander i.
$E(a, k)$	antal af reserve mandskab i lufthavn a .
e_v^m	omkostningen ved at bruge et reserve mandskab til at betjene den v 'te flyvning i mandskab m plan.
n_i	antal af passagerer hvis sidste del af rejseplan er flyvning i .
d_i^t	er forsinkelses omkostningen per ikke-forstyrret passager tildelt kopi t af flyvning i .
$HT(r, n)$	de n 'te flyvning i rejseplan r .
n_r	antallet af passagerer på rejseplan r
$\gamma_{a1_m(v)}^a = 1$	hvis mandskab m 's v 'te planlagte flyvninger skal lette fra a
$\gamma_{a2_m(v)}^a = 1$	hvis mandskab m 's v 'te planlagte flyvninger skal ankomme i a
$\delta_m^k = 1$	hvis mandskab m kan betjene flåde type k .
$\beta_i^r = 1$	hvis rejseplan r slutter med flyvning i 0 ellers.

Bilag 3

$$\left. \begin{array}{l}
 \overbrace{x_{i_m(1)}^t \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(2)} - x_{i_m(1)}^t \gamma_{a2_m(1)}^{a1_m(2)} - r_1^m \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(2)}}^{v=1} + \\
 \overbrace{x_{i_m(2)}^t \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(2)} - x_{i_m(2)}^t \gamma_{a2_m(2)}^{a1_m(2)} - r_2^m \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(2)}}^{v=2} \leq 0
 \end{array} \right\} j=2$$

$$\left. \begin{array}{l}
 \overbrace{x_{i_m(1)}^t \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(3)} - x_{i_m(1)}^t \gamma_{a2_m(1)}^{a1_m(3)} - r_1^m \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(3)}}^{v=1} + \\
 \overbrace{x_{i_m(2)}^t \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(3)} - x_{i_m(2)}^t \gamma_{a2_m(2)}^{a1_m(3)} - r_2^m \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(3)}}^{v=2} + \\
 \overbrace{x_{i_m(3)}^t \gamma_{a1_m(3)}^{a1_m(3)} - x_{i_m(3)}^t \gamma_{a2_m(3)}^{a1_m(3)} - r_3^m \gamma_{a1_m(3)}^{a1_m(3)}}^{v=3} \leq 0
 \end{array} \right\} j=3$$

$$\left. \begin{array}{l}
 \overbrace{x_{i_m(1)}^t \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(4)} - x_{i_m(1)}^t \gamma_{a2_m(1)}^{a1_m(4)} - r_1^m \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(4)}}^{v=1} + \\
 \overbrace{x_{i_m(2)}^t \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(4)} - x_{i_m(2)}^t \gamma_{a2_m(2)}^{a1_m(4)} - r_2^m \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(4)}}^{v=2} + \\
 \overbrace{x_{i_m(3)}^t \gamma_{a1_m(3)}^{a1_m(4)} - x_{i_m(3)}^t \gamma_{a2_m(3)}^{a1_m(4)} - r_3^m \gamma_{a1_m(3)}^{a1_m(4)}}^{v=3} + \\
 \overbrace{x_{i_m(4)}^t \gamma_{a1_m(4)}^{a1_m(4)} - x_{i_m(4)}^t \gamma_{a2_m(4)}^{a1_m(4)} - r_4^m \gamma_{a1_m(4)}^{a1_m(4)}}^{v=4} \leq 0
 \end{array} \right\} j=4$$

Bilag 4

Eksempel på bibetingelse (5.8) med 4 flyvninger i en duty. Med 4 flyvninger, bliver der tre bibetingelser som skal holde, $j = 2, \dots, n_m = 4$. Med $j = 2$ er der ingen problemer. Men når flyvning 3 og 4 tjekkes, kan der opstå et problem. Hvis alle lufthavnene i en duty er forskellige, på nær start og slut lufthavnen, virker bibetingelsen fint. Men i det tilfælde, at det er de to samme lufthavne der flyves mellem, opstår et problem. Nedenfor ses hvorfor det går galt.

For flyvningerne 1, 2 og 3: Nedenfor er bibetingelsen opskrevet, hvor $j = 3$ og hvor første, anden og tredje linje er v lig henholdsvis 1, 2 og 3. De variable hvor $\gamma = 0$ er skrevet med blå, således at de relevante led i bibetingelsen fremgår tydeligt.

Den første bibetingelse, er med tre forskellige lufthavne.

Tre forskellige lufthavne:

$$\begin{aligned} & x_{i_m(1)}^t \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(3)} - x_{i_m(1)}^t \gamma_{a2_m(1)}^{a1_m(3)} - r_1^m \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(3)} + \\ & x_{i_m(2)}^t \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(3)} - x_{i_m(2)}^t \gamma_{a2_m(2)}^{a1_m(3)} - r_2^m \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(3)} + \\ & x_{i_m(3)}^t \gamma_{a1_m(3)}^{a1_m(3)} - x_{i_m(3)}^t \gamma_{a2_m(3)}^{a1_m(3)} - r_3^m \gamma_{a1_m(3)}^{a1_m(3)} \leq 0 \end{aligned}$$

Som man kan se er det kun $\gamma_{a2_m(2)}^{a1_m(3)}$ og $\gamma_{a1_m(3)}^{a1_m(3)}$ som er lig 1. De to betyder at, flyvning 2 ankommer i den lufthavn 3 afgår fra og flyvning 3 afgår i den lufthavn flyvning 3 afgår fra. Her ses det tydeligt at hvis flyvning 3 er besluttet til at afgå, så skal flyvning 2 også vælges eller et reserve mandskab skal indsættes på flyvning 3. Hvis flyvning 2 er aflyst, vil mandskabet ikke ankomme til lufthavnen hvor flyvning 3 afgår fra.

Den næste, er hvor lufthavnen fra flyvning 1 og flyvning 3 er ens. I en duty med fire flyvninger kan det ske at mandskabet flyver tur-retur mellem de samme to lufthavne.

To forskellige lufthavne:

$$\begin{aligned} & x_{i_m(1)}^t \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(3)} - x_{i_m(1)}^t \gamma_{a2_m(1)}^{a1_m(3)} - r_1^m \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(3)} + \\ & x_{i_m(2)}^t \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(3)} - x_{i_m(2)}^t \gamma_{a2_m(2)}^{a1_m(3)} - r_2^m \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(3)} + \\ & + x_{i_m(3)}^t \gamma_{a1_m(3)}^{a1_m(3)} - x_{i_m(3)}^t \gamma_{a2_m(3)}^{a1_m(3)} - r_3^m \gamma_{a1_m(3)}^{a1_m(3)} \leq 0 \end{aligned}$$

Her er foruden $\gamma_{a2_m(2)}^{a1_m(3)} = \gamma_{a1_m(3)}^{a1_m(3)} = 1$, også $\gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(3)} = 1$. Det er fordi lufthavn 1 og 3 er den samme.

Hvis alle tre flyvninger gennemføres, skal et reservemandskab indsættes på første eller tredje flyvning for at overholde bibetingelsen. Det vil typisk blive på tredje flyvning. Omkostningen ved reservemandskab på første flyvning er sat meget højt, da der i kraft af definitionen, ikke skal indsættes reservemandskab på første flyvning på grund af aflysning af tidligere flyvning. Hvis den anden flyvning ikke gennemføres, skal der for at overholde

bibetingelsen, både indsættes reserve mandskab på første og tredje flyvning. Hvis først flyvning også er aflyst, skal reservemandskab kun indsættes på tredje flyvning, ligesom tidligere.

Men det er ikke nødvendigt at indsætte reservemandskab, da der til først flyvning allerede er et mandskab klar, og hvis første flyvning ikke gennemføres er det oprindelige klar til næste flyvning i samme lufthavn.

For flyvningerne 1, 2, 3 og 4: Her er $j = 4$ og hvor første, anden, tredje og fjerde linje er v lig henholdsvis 1, 2, 3 og 4. Igen er de variable hvor $\gamma = 0$ skrevet med blå og de relevante led i bibetingelsen fremgår tydeligt.

Fire forskellige lufthavne:

$$\begin{aligned}
& x_{i_m(1)}^t \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(4)} - x_{i_m(1)}^t \gamma_{a2_m(1)}^{a1_m(4)} - r_1^m \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(4)} + \\
& x_{i_m(2)}^t \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(4)} - x_{i_m(2)}^t \gamma_{a2_m(2)}^{a1_m(4)} - r_2^m \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(4)} + \\
& x_{i_m(3)}^t \gamma_{a1_m(3)}^{a1_m(4)} - x_{i_m(3)}^t \gamma_{a2_m(3)}^{a1_m(4)} - r_3^m \gamma_{a1_m(3)}^{a1_m(4)} + \\
& + x_{i_m(4)}^t \gamma_{a1_m(4)}^{a1_m(4)} - x_{i_m(4)}^t \gamma_{a2_m(4)}^{a1_m(4)} - r_4^m \gamma_{a1_m(4)}^{a1_m(4)} \leq 0
\end{aligned}$$

Ved fire forskellige lufthavne er det igen intet problem. Hvis flyvning 4 gennemføres skal mandskabet have betjent flyvningen før eller et reserve mandskab skal indsættes.

Ved to forskellige lufthavne holder bibetingelsen stadig.

Kun to lufthavne:

$$\begin{aligned}
& x_{i_m(1)}^t \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(4)} - x_{i_m(1)}^t \gamma_{a2_m(1)}^{a1_m(4)} - r_1^m \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(4)} + \\
& x_{i_m(2)}^t \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(4)} - x_{i_m(2)}^t \gamma_{a2_m(2)}^{a1_m(4)} - r_2^m \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(4)} + \\
& x_{i_m(3)}^t \gamma_{a1_m(3)}^{a1_m(4)} - x_{i_m(3)}^t \gamma_{a2_m(3)}^{a1_m(4)} - r_3^m \gamma_{a1_m(3)}^{a1_m(4)} + \\
& + x_{i_m(4)}^t \gamma_{a1_m(4)}^{a1_m(4)} - x_{i_m(4)}^t \gamma_{a2_m(4)}^{a1_m(4)} - r_4^m \gamma_{a1_m(4)}^{a1_m(4)} \leq 0
\end{aligned}$$

Hvis både første og tredje flyvning gennemføres er valget af anden og fjerde flyvning uden betydning her. Hvis første flyvning er aflyst, vil et reserve mandskab være indsat på anden flyvning, hvis gennemført, i kraft af bibetingelsen for den anden flyvning. Hvis tredje flyvning er aflyst skal reservemandskab indsættes på anden eller fjerde, hvis begge gennemføres. Da omkostningerne minimeres bliver reservemandskabet indsat på den flyvningen hvor omkostningerne til reservemandskabet er mindst.

Hvis en duty eksempelvis består af seks flyvninger mellem tre forskellige lufthavne, hvor der flyves $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ og så fremdeles. Så opstår problemet igen. I dette tilfælde, er kun tredje flyvning med ankomst i A og både første og fjerde flyvning afgår fra A.

Tre forskellige lufthavne:

$$\begin{aligned}
& x_{i_m(1)}^t \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(4)} - x_{i_m(1)}^t \gamma_{a2_m(1)}^{a1_m(4)} - r_1^m \gamma_{a1_m(1)}^{a1_m(4)} + \\
& x_{i_m(2)}^t \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(4)} - x_{i_m(2)}^t \gamma_{a2_m(2)}^{a1_m(4)} - r_2^m \gamma_{a1_m(2)}^{a1_m(4)} + \\
& x_{i_m(3)}^t \gamma_{a1_m(3)}^{a1_m(4)} - x_{i_m(3)}^t \gamma_{a2_m(3)}^{a1_m(4)} - r_3^m \gamma_{a1_m(3)}^{a1_m(4)} + \\
& + x_{i_m(4)}^t \gamma_{a1_m(4)}^{a1_m(4)} - x_{i_m(4)}^t \gamma_{a2_m(4)}^{a1_m(4)} - r_4^m \gamma_{a1_m(4)}^{a1_m(4)} \leq 0
\end{aligned}$$

Da der højst ankommer en tidligere flyvning til lufthavnen fjerde flyvning afgår fra, vil der igen skulle indsættes mindst et reservemandskab. Igen er der ikke taget højde for at mandskabet er klar inden første flyvning i lufthavnen som også viser sig at være afgangslufthavnen for fjerde flyvning. Hvilket, som nævnt før, er grunden til at bibetingelsen skal holde for alle flyvninger efter den første.

Bilag 5

Dato	Rute	Gnf.	Aflyste	Gen. fors.	Rettidig	Planlagte	I alt
Den 20. december 2006	Fra København	154	5	17	72%	159	} 318
	Til København	154	5	18	67 %	159	
Den 23. december 2010	Fra København	78	3	60	7 %	81	} 172
	Til København	87	4	71	13 %	91	
Den 9. december 2012	Fra København	121	20	39	36 %	141	} 261
	Til København	103	17	45	30 %	120	
Den 21. januar 2013	Fra København	156	7	12	77 %	163	} 328
	Til København	158	7	11	81 %	165	

Bilag 6

SAS afgange fra København den 23. december 2010

Rute / Forventet	Genemførte flyvninger	Aflyste flyvninger	Gen. fors.	Rettidig %
Total	78	3	60	7
SK597 - 0100	0	1	0	100
SK567 - 0100	0	1	0	100
SK559 - 0100	0	1	0	100
SK1205 - 0705	1	0	6	100
SK501 - 0745	1	0	22	0
SK744 - 0755	1	0	261	0
SK601 - 0755	1	0	48	0
SK1243 - 0800	1	0	58	0
SK1870 - 0810	1	0	41	0
SK2862 - 0810	1	0	88	0
SK1416 - 0810	1	0	114	0
SK434 - 0810	1	0	34	0
SK751 - 0810	1	0	152	0
SK593 - 0815	1	0	62	0
SK2551 - 0815	1	0	60	0
SK1462 - 0815	1	0	56	0
SK565 - 0820	1	0	54	0
SK1587 - 0820	1	0	50	0
SK539 - 0825	1	0	51	0
SK1685 - 0825	1	0	82	0
SK2519 - 0850	1	0	35	0
SK2533 - 0855	1	0	89	0
SK537 - 0905	1	0	170	0
SK1637 - 0905	1	0	50	0
SK777 - 0905	1	0	88	0
SK755 - 0910	1	0	68	0
SK1464 - 0920	1	0	105	0
SK1207 - 0940	1	0	81	0
SK1454 - 1020	1	0	105	0
SK2718 - 1020	1	0	105	0
SK793 - 1025	1	0	79	0
SK681 - 1115	1	0	75	0
SK1420 - 1155	1	0	76	0
SK1456 - 1155	1	0	105	0
SK503 - 1205	1	0	4	100
SK1213 - 1215	1	0	13	100
SK1742 - 1215	1	0	86	0
SK2746 - 1215	1	0	57	0
SK909 - 1220	1	0	54	0

SK925 - 1220	1	0	29	0
SK2892 - 1240	1	0	80	0
SK2868 - 1410	1	0	128	0
SK438 - 1410	1	0	59	0
SK1621 - 1410	1	0	33	0
SK679 - 1410	1	0	49	0
SK1458 - 1415	1	0	92	0
SK1422 - 1415	1	0	78	0
SK759 - 1420	1	0	52	0
SK1215 - 1450	1	0	61	0
SK1257 - 1450	1	0	31	0
SK505 - 1455	1	0	91	0
SK2882 - 1500	1	0	63	0
SK1521 - 1505	1	0	55	0
SK712 - 1505	1	0	40	0
SK1593 - 1515	1	0	36	0
SK1549 - 1520	1	0	41	0
SK1655 - 1520	1	0	25	0
SK2583 - 1535	1	0	77	0
SK943 - 1540	1	0	52	0
SK1517 - 1605	1	0	33	0
SK1217 - 1620	1	0	30	0
SK2537 - 1640	1	0	27	0
SK1667 - 1700	1	0	97	0
SK1259 - 1705	1	0	76	0
SK2685 - 1705	1	0	20	0
SK617 - 1715	1	0	16	0
SK2535 - 1730	1	0	51	0
SK541 - 1735	1	0	52	0
SK609 - 1740	1	0	71	0
SK663 - 1805	1	0	73	0
SK651 - 1805	1	0	82	0
SK553 - 1810	1	0	65	0
SK1470 - 1810	1	0	46	0
SK1426 - 1810	1	0	39	0
SK1507 - 1815	1	0	100	0
SK1219 - 1855	1	0	52	0
SK1478 - 1950	1	0	99	0
SK1430 - 2015	1	0	33	0
SK995 - 2105	1	0	24	0
SK973 - 2250	1	0	16	0
SK1225 - 2255	1	0	25	0

Bilag 7

83

By	Land	Fra CPH			Til CPH			Årlig sum	gns pr dag	% af flyvninger
		ialt fly	Gnf	Aflyst	ialt fly	Gnf	Aflyst			
Oslo	Norge	4.005	3977	28	4.001	3970	31	8.006	22	7,9%
Stockholm	Sverige	3.823	3786	37	3.823	3788	35	7.646	21	7,6%
Aalborg	Danmark	2.248	2228	20	2.247	2216	31	4.495	12	4,5%
London	UK	1.919	1903	16	1.915	1896	19	3.834	10	3,8%
Göteborg	Sverige	1.899	1888	11	1.897	1883	14	3.796	10	3,8%
Bergen	Norge	1.850	1827	23	1.849	1823	26	3.699	10	3,7%
Stavanger	Norge	1.780	1762	18	1.781	1751	30	3.561	10	3,5%
Hamburg	Tyskland	1.481	1471	10	1.478	1467	11	2.959	8	2,9%
Aarhus	Danmark	1.441	1421	20	1.430	1402	28	2.871	8	2,8%
Düsseldorf	Tyskland	1.418	1404	14	1.416	1401	15	2.834	8	2,8%
Amsterdam	Holland	1.383	1369	14	1.382	1367	15	2.765	8	2,7%
Brussels	Belgien	1.368	1365	3	1.368	1363	5	2.736	7	2,7%
Frankfurt	Tyskland	1.354	1343	11	1.355	1340	15	2.709	7	2,7%
München	Tyskland	1.211	1203	8	1.213	1201	12	2.424	7	2,4%
Gdansk	Polen	1.201	1190	11	1.203	1183	20	2.404	7	2,4%
Paris	Frankrig	1.147	1137	10	1.148	1132	16	2.295	6	2,3%
Trondheim	Norge	1.080	1062	18	1.078	1053	25	2.158	6	2,1%
Berlin	Tyskland	956	950	6	955	950	5	1.911	5	1,9%
Vilnius	Litauen	933	927	6	932	923	9	1.865	5	1,8%
Alle	flyvninger	50.514	50.012	502	50.458	49.823	635	100.972	276	100,0%

Fra stat.trafikstyrelsen.dk, Regularitetsstatistik for 2012, København (CPH) og Scandinavian (SAS)

Bilag 8

Aflyste flyvninger den 9. december med periodens planlagte tidspunkter.

Til/fra	Rute	Planlagt tidspunkt	Periode
Fra København	SK1637	10:05	Hele december
Fra København	SK681	10:05	1.-14. december
Fra København	SK773	10:20/13:00	Hele december
Fra København	SK1742	11:10/12:15/13:05	Hele december
Fra København	SK763	11:15/18:55	Hele december
Fra København	SK1247	12:15/12:40	Hele december
Fra København	SK2882	12:20/13:00	Hele december
Fra København	SK2892	12:50	Hele december
Til København	SK774	13:30/16:10	Hele december
Til København	SK1638	13:55	Hele december
Til København	SK1248	13:55/14:20	Hele december
Fra København	SK2868	14:10/14:15	Hele december
Til København	SK764	14:15/21:55	Hele december
Fra København	SK675	14:25	Hele december
Til København	SK682	14:35/16:25/17:25/18:35	Hele december
Fra København	SK1257	14:50/18:45	Hele december
Fra København	SK1517	15:55	Hele december
Til København	SK2889	16:10/16:45	Hele december
Fra København	SK2872	16:20	Hele december
Til København	SK1258	16:30	Hele december
Til København	SK760	16:50/18:30	Hele december
Fra København	SK687	16:55	Hele december
Til København	SK2873	17:25/19:15	Hele december
Fra København	SK2535	17:30	Hele december
Fra København	SK1635	17:50	Hele december
Fra København	SK553	18:10	Hele december
Til København	SK676	19:00	Hele december
Fra København	SK1219	19:05/19:20/19:45	Hele december
Til København	SK2869	19:30	Hele december
Til København	SK1220	21:00/21:25/21:40	Hele december
Til København	SK1516	21:10	Hele december
Til København	SK554	21:40	Hele december
Til København	SK1636	21:45	Hele december
Til København	SK2536	22:00	Hele december
Til København	SK688	22:00	Hele december
Fra København	SK1273	22:45	Hele december
Fra København	SK2884	22:50	Hele december