

COPENHAGEN BUSINESS SCHOOL

CAND. MERC. (MAT.)

17. MAJ 2021

Passager Boarding Problem

Kandidat Afhandling

Skrevet af:

Katrine Sponholtz (110993)

Vejleder:

Hans Keiding

Antal sider: 79

Anslag: 119.180

Abstract

The purpose of this thesis is to gain a profound knowledge and understanding of the passenger boarding problem to examine the best boarding method.

This thesis consists of three parts. Firstly, a general description of the problem and definitions of terms that are relevant for airplane boarding. Secondly, known boarding methods have been studied from academic researches to provide knowledge about boarding processes and the many related factors. Thirdly, an agent-based simulation model has been programmed to test different boarding methods to investigate which boarding method has the fastest boarding time.

The analysis of the simulation shows that a boarding method with a highly ordered sequence gives fast boarding times whereas a method where passengers board the airplane more randomly is not as quick. Different factors, such as passengers who do not follow the boarding sequence and passengers with priority boarding can affect the boarding sequence and destroy the good boarding results. Therefore, boarding strategies with a highly ordered sequence has proven not always to be the best. Actually, more random boarding strategies can in some instances be better.

It is not possible to give an unambiguous answer to which boarding strategy is the optimal. There are many factors to consider when choosing a boarding strategy. It has to be efficient, cheap and give costumers the best possible experiences.

Contents

1	Introduktion	1
1.1	Opgavens struktur	2
2	Elementer i boardingprocessen	3
2.1	Boardingstrategi	3
2.2	Ground handling	3
2.3	Turn around time	4
2.4	Passagerers betydning for boardingproblemet	5
2.5	Forstyrrelser i boardingprocessen	6
3	Passager boarding problemet	8
3.1	Tidligere litteratur	9
3.2	Hvorfor dette problem?	10
4	Metode til at undersøge boardingstrategier	12
4.1	Flymodel	13
5	Klassiske boardingmetoder	14
6	Mere komplicerede boardingmetoder	18
6.1	Steffen, Optimal boarding method for airline passengers	18
6.2	En ny boardingmetode	23
7	Komplicerede boardingmetoder - flere aspekter	28
7.1	Transferbus metode	28
7.2	Prioritetsboarding	36
7.3	Passagerer, som ikke overholder boarding regler	40
8	Boardning og Covid-19	46
8.1	Boardingmetode som begrænser coronasmitte	47

9	Simulering af boardingmetoder	55
9.1	En agentbaseret simuleringsmetode	55
9.2	Simuleringsmodellen	57
9.2.1	Passageregenskaber	57
9.2.2	Passageradfærd	58
9.2.3	Simuleringsmiljøet - flykabinen	59
9.2.4	Simuleringsmodellens interface	60
9.2.5	Simuleringen/simuleringskørsel	62
9.3	Simuleringsresultater	65
9.3.1	Når alle passagerer følger rækkefølgen	66
9.3.2	Når passagerne ikke følger reglerne	69
9.3.3	Boardingmetodernes omkostninger	73
10	Konklusion	75
11	Litteratur	77
12	Bilag	80
12.1	Bilag A	80
12.2	Bilag B	83
12.3	Bilag C	84
12.4	Bilag D	89
12.5	Bilag E	89
12.6	Bilag F	90
12.7	Bilag G	90
12.8	Bilag H	90

1 Introduktion

Hver dag er der millioner mennesker, som tager til en lufthavn for at komme ud at flyve. Det er både rejsende, som skal på charterferie eller storbyferie, forretningsrejsende eller rejsende med andre formål. Når den rejsende er kommet ud i lufthavnen og har tjekket sig selv og sin bagage ind, så vil de fleste passagerer også gerne kunne sætte sig op i sit fly og starte turen til deres destination med det samme.

Det kan derfor være frustrerende at stå i lange køer og vente på at få lov til at board et fly, hvilket er tilfældet for mange tusinder rejsende hver dag. Effektiv boarding af passagerfly har længe været et problem, og problemet er ikke blevet mindre i takt med, at luftfartssektoren er ekspanderet de sidste årtier på grund af stigning i passagerer. Med undtagelse af det sidste år, hvor hele verdenen har været ramt af Covid-19, som i høj grad har sat sit spor i flytrafikken.¹

Det ændrer ikke på, at luftfartsselskaberne stadig i dag forsøger at finde en funktionel og optimal metode at håndtere boardingprocessen på. At få passagerer ombord på et fly er nemlig ofte ikke optimalt organiseret, da mange flyselskaber bruger boardingmetoder, som ikke er specielt effektive.

Flyselskaberne bruger i dag mange forskellige typer strategier til at få boardet passagerer og deres bagage hurtigst muligt. Det tager længere tid at board passagerer end at fylde benzin og genopfylde flyet med f.eks. toldfrie vare, mad og drikke, hvorfor en mere effektiv boardingstrategi kan give besparelser.²

Et flyselskabs boardingstrategi er et sted, der kan spares meget tid på, da det er en af de mest tidskrævende processer, når et fly er på jorden og parkeret ved en gate. En effektiv boardingstrategi, kan udover at være behjælpelig med at spare tid, også resultere i store årlige omkostningsbesparelser for et flyselskab og samtidig give gode passageroplevelser.³

¹CPH

²Steffen, 2008

³Jaehn & Neumann, 2014

Denne afhandling gennemgår forskellige boardingstrategier for at undersøge, hvor effektive de er, og hvor meget boardingtiden påvirkes af forskellige aspekter i boardingprocessen.

Konkret undersøger denne afhandling følgende problemformulering:

Hvilken metode er den optimale til at løse passager boarding problemet?

Problemstillingen vil blive besvaret gennem analyser, og en agentbaseret simuleringsmodel, som tester adskillige boardingmodeller. Der vil dertil også gives et bud på, hvilken metode der er den bedste og giver den hurtigste boardingtid.

1.1 Opgavens struktur

Strukturen for denne afhandling er som følger. I afsnit 2 gennemgås elementer i boardingprocessen, som beskrives for at gøre det lettere at forstå selve boardingprocessen. Problemer som gør, at boarding ikke altid er så effektiv forklares også i dette afsnit. I afsnit 3 beskrives selve passager boarding problemet, og det uddybes også, hvorfor netop problemstillingen er relevant i dag. I afsnit 4 beskrives metoderne, som bruges til at besvare problemstillingen. I afsnit 5, 6, 7 og 8 analyseres og beskrives forskellige boardingmetoder og forskellige aspekter i boardingprocessen. I afsnit 5 og 6 beskrives simple og mindre komplicerede metoder, hvorimod afsnit 7 undersøger mere komplekse boardingmetoder. I afsnit 8 tages der fat i den aktuelle Covid-19 pandemi, som i høj grad har haft påvirkning på flytrafikken og også boardingprocesser. I afsnit 9 præsenteres en agentbaseret simuleringsmodel, som er blevet programmeret med det formål at teste mange af de undersøgte boardingmetoder og sammenligne metodernes boardingtid. Afslutningsvis konkluderes på afhandlingens problemformulering.

2 Elementer i boardingprocessen

Inden boardingproblemet beskrives og analyseres, er det relevant at vide noget om de operationelle processer, som er i en lufthavn og præsentere betydningsfulde begreber for boarding af fly. Dette gør forståelsen af boardingprocessen og problemet lettere at forstå.

2.1 Boardingstrategi

En boardingstrategi eller boardingmetode påvirker eller bestemmer den rækkefølge, som passagerer boarder fly. Generelt er det vigtigt, at en boardingstrategi er let at forstå for passagerer og let at bruge for flyselskabers personale. En boardingstrategis hovedformål er at minimere tiden, som passagerer bruger på at boarde et fly, men det er også vigtigt at strategien har lave omkostninger og en høj passager tilfredshed.⁴

2.2 Ground handling

Lufthavne og de mange procedurer, som foregår i en lufthavn er grundlæggende før passagerer kan komme ud at flyve. I lufthavne lander og letter fly, og der er plads til de nødvendige faciliteter til at servicere et fly imellem flyveture. Operationerne, som foregår i en lufthavn, kan deles op i *landside*, hvor passagerer ankommer, afleverer deres bagage og gennemgår sikkerhedskontrol, og *airside*, hvor fly lander og letter, og passagerer boarder og deboarder fly. En vigtig procedure under airside, som sikrer, at et fly bliver klar afgang, er det såkaldte *ground handling* eller *turn around*, hvor et fly bliver serviceret, når det er parkeret ved en gate. Det er både lufthavne, flyselskaber, og udvalgte handlingselskaber, som udfører opgaver vedrørende ground handling.⁵

⁴Jaehn & Neumann, 2014

⁵Ashford, Stanton, Moore, Coutu & Beasley, 2013

2.3 Turn around time

Turn around time (TAT) er tiden, der bruges til at aflæsse flyet efter ankomst til gaten og forberede flyet til næste afgang. I TAT er der meget, som skal nås, da ground handling indeholder en del stadier, som kan ses i modellen af Landeghem & Beuselinck fra 2002 i figur 1. Det er f.eks. at få folk af flyet efter det er landet, aflæsse bagage og læsse ny bagage til næste tur, tankning, rengøring af kabinen og klargøre flykøkkenet. Hurtigere boardingmetoder kan være med til at reducere TAT tiden. Det er estimeret, at TAT tager ca. 30-60 minutter. Mange af processerne for TAT afhænger af hinanden og kan ikke gøres på samme tid. F.eks. kan rengøringsprocessen ikke starte før flyet er helt tomt, og boardingprocessen kan ikke starte, før rengøringsprocessen og tankning af flyet er færdiggjort.⁶

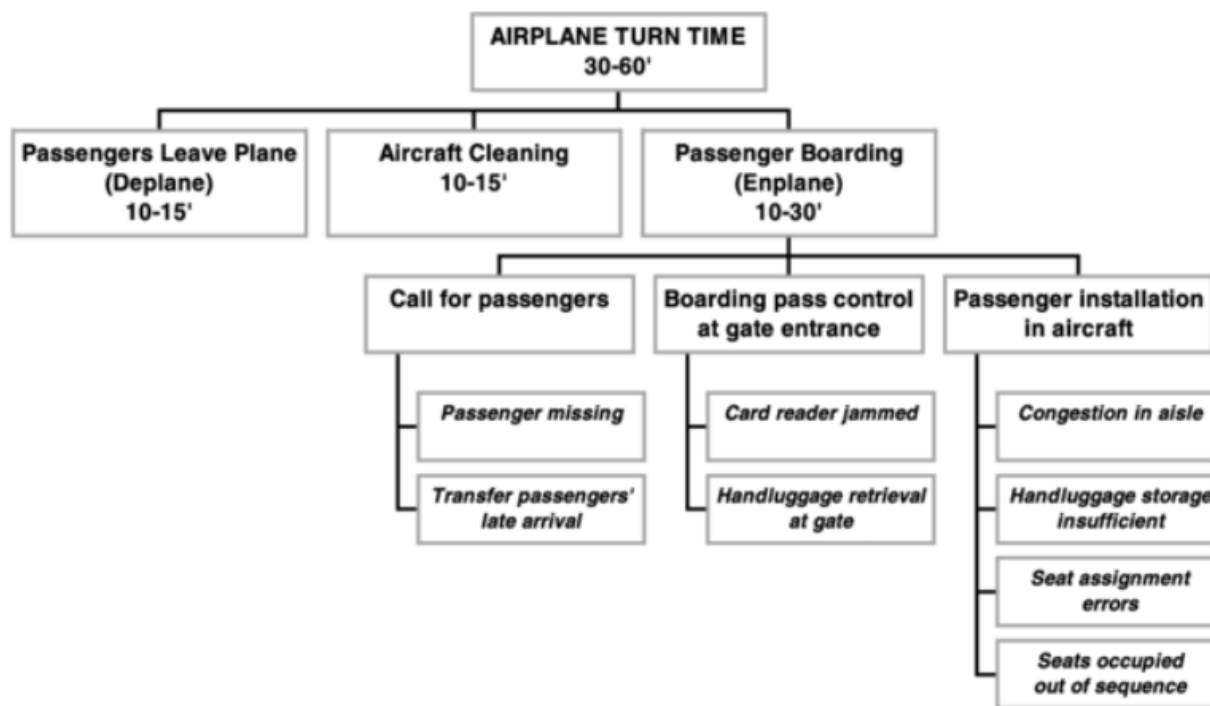


Figure 1: Elementer for TAT (Landeghem & Beuselinck, 2002)

⁶Landeghem & Beuselinck, 2002

2.4 Passagerers betydning for boardingproblemet

Boarding af et fly er en væsentlig kilde til forsinkelser og passagerers opførsel kan påvirke boardingprocessen. Boardingprocessen, inden passagerne kommer ombord på et fly, kan komprimeres til nedenstående tre trin. Det er vigtigt, at passagerne følger disse trin da deres adfærd over for processen kan have stor indflydelse på TAT.

1. Flyselskabets personale, som står i gaten, annoncerer boardingprocessens start. Passagerer begynder dermed at danne en kø ved gaten. Der kan forekomme forsinkelser, hvis en eller flere passagerer er forsinket
2. Personalet tjekker alle passagerers boardingpas og dokumentere passagerens boardingankomst med en billetlæser
3. Passagerer går ombord på flyet.

Når passagerer er ombord på et fly, laver de en kø i en enkelt linje på grund af kabinegangens størrelse, indtil de når deres tildelte sæde. Den smalle kabinegang gør, at enhver form for forstyrrelse i boardinggen skaber kø for passagerne.⁷

Passagerne skal derudover finde plads til deres håndbagage på bagagehylden over deres pladser, inden de sætter sig ned. Uanset hvor god en boardingstrategi, der bliver lagt, er passagerens hastighed for, hvor hurtigt de lægger bagagen på plads, og hvor hurtigt de går, afgørende for TAT. Passagerne har en række trin, de skal igennem inden afgang, og det kan være trin, som er krævet fra både lufthavnens og flyselskabets side, men det kan også være passagerens egne personlige behov, som skal opfyldes. Der er 5 trin, som er relevante for boardinggen af et fly og opstillingen af en model for dette, og de er vist i figur 25.

⁷Landeghem & Beuselinck, 2002



Figure 2: Passagerstadier ved boarding af fly

Denne model er bygget til folk, som har håndbagage med på deres rejse, men trin 2 og 3 kan fjernes fra figuren, hvis passagerer ikke har medbragt håndbagage. Derudover kan trin 3 også fjernes, hvis passagerers håndbagage ikke er så stor, at den skal have en plads på bagagehylden. Denne model er simplificeret i sin opbygning, da den ikke beskriver noget om, hvordan man boarder flyet. Der kan altså tilføjes flere trin, alt efter, hvilken boardingmetode, der benyttes.

Modellen viser, som tidligere nævnt, kun de relevante trin i forhold til selve boardingprocessen, men passagerer skal igennem yderligere trin inden de når til gate området, og inden de skal boarder flyet. Disse trin er f.eks. check-in og paskontrol.⁸

2.5 Forstyrrelser i boardingprocessen

Der er to typer af forstyrrelser i boardingprocessen, og ved at minimere antallet af forventede forstyrrelser, kan boardingtiden minimeres. Den første forstyrrelse er sædeforstyrrelse. En sædeforstyrrelse opstår, når f.eks. en gangpassager boarder flyet før passageren, som har vindue- eller midtersæde på samme række i flyet. Det kan f.eks. være, hvis en passager har fået tildelt og sat sig i sæde 2C. Passageren vil være nødt til at flytte sig ud i kabinegangen for at passagerne med sæde 2A og 2B kan få adgang til deres sæde. Dette er også illustreret i figur 3.

1A	1B	1C	 P 2A	1D	1E	1F
2A	2B	2C  P 2C		2D	2E	2F

Figure 3: Sædeforstyrrelse: udsnit af fly med to passagerer, hvor teksten under passagerne angiver passagerens tildelte sæde.

⁸Jaehn & Neumann, 2014

Den anden form for forstyrrelse er gangforstyrrelser. Det opstår, når passagerer bevæger sig ned ad kabinegangen for at finde sit sæde og på vejen må vente på, at passageren foran sig lægger medbragt håndbagage på plads i bagagehylden.

Begge former for forstyrrelser skaber kø og længere boardingtider. Boardingstrategierne, som denne afhandling analyserer, prøver alle med forskellige metoder at minimere eller helt fjerne gang- og/eller sædeforstyrrelser.⁹

⁹Landeghem & Beuselinck, 2002

3 Passager boarding problemet

I dette afsnit præsenteres boardingproblemet, og hvordan det er blevet belyst af forskere tidligere i litteraturen. Det gennemgås også, hvorfor netop dette problem er aktuelt og interessant at belyse.

Passager boarding problemet kan meget kort præsenteres som forstyrrelser i boarding af passagerer, som fører til lange boardingtider, som opstår på baggrund af flyselskabernes dårlige boardingmetoder. Boardingprocessen starter ved gaten i lufthavnsterminalen og afsluttes, når alle passagerer sidder på deres plads i flyet med deres håndbagage opbevaret i bagagehylden. Boardingstrategier kan bidrage til at systematisere og optimere boardingprocesser. I praksis implementeres boardingstrategier typisk gennem boardingnumre.¹⁰

Problemet kan også defineres som et integer linear programming problem (eller et mixed integer linear programming problem), som er et matematisk optimeringsprogram, hvor variablerne i modellen er begrænset til at være heltal.¹¹ Der findes ikke en generel måde at opskrive optimeringsproblemet for boarding på. En ting, der dog er gældende uanset, hvordan man vil opstille boardingproblemet, er, at boardingtiden skal minimeres:

$$\min \text{ boardingtid} \tag{1}$$

En af udfordringerne ved passager boarding problemet er altså, hvordan optimeringsproblemet skal opskrives. Der findes mange variationer af problemet, da boarding har mange aspekter, der skal tages højde for, bl.a. passageradfærd, håndbagage og forstyrrelser, som kan opstå ved boarding. Når der i litteraturen forsøges at finde løsninger til boardingproblemet, lægges der ofte vægt på ét aspekt af boardingproblemet. Det kan f.eks. være at løse håndbagageproblemet ved at lave en boardingstrategi, som forsøger at minimere den tid en passagerer skal bruge på at bevæge sig rundt i flykabinen for at finde plads til sin håndbagage. Det kan også være sæde og/eller gangforstyrrelser eller prioritetsboarding. I afsnit 7.1 (transferbus afsnittet) på side 27,

¹⁰Hutter, Jaehn & Neumann, 2019

¹¹Hillier & Lieberman, 2015

er der et eksempel på, hvordan en optimeringsligning kan være opstillet, og hvor kompliceret boardingproblemet kan se ud. Dette er en af de mere komplicerede boardingmetoder, og den tager hensyn til flere aspekter i boardingprocessen.

Udover det udfordrende i at definere problemet, er det ikke altid simpelt at finde en løsning til problemet. Det er altså ikke let at forsøge at finde en ny effektiv boardingmetode.

Som det også blev beskrevet tidligere i opgaven, er der mange operationelle processer i en lufthavn, som alle kan påvirke TAT tiden. Det er derfor nødvendigt at effektivisere alle elementer af ground handling, inklusiv boarding, for at få den optimale TAT. Det vil der dog ikke være fokus på i denne afhandling.

Det giver ikke mening at reducere boardingtiden ved at indføre en ny boardingstrategi, hvis det medfører højere omkostninger end den nuværende strategi. Det handler altså derfor ikke kun om at minimere boardingtiden, idet flyselskabernes incitament til at benytte nye og smarte boardingmetoder nemlig bunder i økonomiske besparelser.¹²

3.1 Tidligere litteratur

Boardingproblemet er blevet forsket igennem mange år og af mange forskere. Der findes dermed rigtig mange løsningsmetoder til problemet, og denne afhandling belyser kun enkelte af metoderne, som f.eks. Outside-in, Steffens metode og en metode hvor transfer busser benyttes. Andre metoder, som også er betydelige og nytænkende, nævnes kort herunder.

Landeghem og Beuselinck undersøgte passagerer, som boarder individuelt for forskellige boardingmetoder. I deres undersøgelser blev de klogere på passageradfærd bl.a., hvor meget håndbagage passagerer medbringer på fly. Deres undersøgelse viste, at boardinggen optimeres, når passagerer boarder bagfra og til fronten af flyet, og fra yderst til inderst af flyet (dvs. i rækkefølgen vindue-, midt- og gangsæde).¹³

¹²Jaehn & Neumann, 2014

¹³Landeghem & Beuselinck, 2002

van den Briel et al. undersøgte boardingproblemet og fandt en ny boardingmetode *Reverse Pyramid*. Dette blev gjort ved at fastslå, hvordan gangforstyrrelser påvirker boardinggen.¹⁴

Ferrari og Nagel betragtede ved simulering forskellige scenarier, hvor passagerer, boarder i grupper og enkeltvis med et fokus på at undersøge forstyrrelse vedrørende passagerer, som boarder for sent eller for tidligt. Et vigtigt resultat i deres studie er, at boardingmetoden Back-to-Front forbedres, når passagerer ikke boarder med deres tildelte boardinggruppe¹⁵.

Notomista et al. forsøger at reducere boardingtiden med hjælp af optiske sensorer, som måler hver persons bevægelighed (for at fastslå bl.a. ganghastighed) og størrelsen og mængde af håndbagage. Ved at lave disse målinger kan boardingtiden dermed reduceres, men det kræver også en omkostning i form af udstyr.¹⁶

3.2 Hvorfor dette problem?

Der kan være flere metoder til at minimere tiden et fly er parkeret i lufthavnen. Der er meget, som ikke kan ændres ved, da der er visse sikkerhedskrav og rengøring fly skal igennem, inden det kan lade fra lufthavnen, men boardingprocessen er ikke en af dem. Flere undersøgelser har påvist, at boardinggen af passagerer er noget, der kan spares en del tid på.

Alle virksomheder, herunder også flyselskaber og lufthavne, er interesseret i at opnå høj profit. Flyselskaber tjener kun penge, når flyene er i luften, og vil gerne minimere den tid flyene er i lufthavnen. Dette er også relevant for lufthavnen, for jo flere fly de kan få igennem deres lufthavn, jo flere penge tjener de.

Der er flere tusinder flyvninger hver dag, og der er ikke blevet færre flyruter de sidste mange år. Tværtimod, er destinationerne forøget. Der er selvfølgelig en stor undtagelse det sidste år, hvor Covid-19 pandemien har haft stor påvirkning på antallet af rejsende, da landegrænser ikke har været åbne. Det er svært at forudse, hvad fremtiden bringer, men det er svært at forestille sig,

¹⁴van den Briel, 2005

¹⁵Ferrari & Nagel, 2005

¹⁶Notomista et al., 2016

at flytrafikken ikke igen kommer til at nærme sig det omfang, som det havde før pandemien, når landegrænserne begynder at åbne op igen. Derudover skaber Covid-19 pandemien nogle helt nye udfordringer for boardingprocessen, idet der er mange sundhedsforanstaltninger at tage hensyn til. Passager boarding problemstillingen er dermed stadig relevant i dag.¹⁷

¹⁷CPH

4 Metode til at undersøge boardingstrategier

I de følgende afsnit beskrives og undersøges en række boardingmetoder. Boarding passager problemet er blevet forsøgt løst ved mange forskellige metoder igennem tidligere litteratur. Udgangspunktet for at undersøge og forstå de forskellige boardingmetoder kommer også fra adskillige videnskabelige artikler, som er skrevet af forskere, som har forsøgt at finde en optimal boardingstrategi. De fleste undersøgte boardingstrategier er blevet simuleret på mange forskellige måder, og det har givet inspiration til lave en agent-baseret simuleringsmodel for at teste og sammenligne de forskellige boardingmetoder til denne afhandling.

Der er både metoder, som kan kaldes for klassiske boardingmetoder, som er meget simple i deres opbygning, men også mere komplicerede boardingmetoder. Boardingmetoderne som bliver præsenteret i senere afsnit er testet ved simuleringer for at se, hvilke metoder som giver de hurtigste boardingtider.

Udover at undersøge de klassiske og mere komplicerede boardingmetoder undersøges også, hvordan boarding af fly bliver påvirket af forskellige faktorer, som ikke alle boardingmetoder tager højde for. Derudover er det meget aktuelt at undersøge, hvilken påvirkning Covid-19 epidemien har for boarding af fly, idet det sandsynligvis kommer til at få en påvirkning på måden at boarde fly, ikke kun lige nu, men også i fremtiden.

Mange af modellerne, som bliver gennemgået i denne afhandling, er blevet lavet inden mange flyselskaber indførte regler omkring håndbagage. I dag må passagerer hos mange flyselskaber kun have et styk håndbagage med, men disse restriktioner har ikke altid været implementeret.¹⁸ Derudover er metoderne ofte modelleret til små fly og dermed korte flyrejser. Nogle af metoderne kan dog godt oversættes til større fly, men det er ikke dem alle.

¹⁸Betak, 2012

4.1 Flymodel

Når forskellige boardingmetoder præsenteres i afhandlingen, vil sekvensen for en boardingmetode også blive visuelt præsenteret for bedre at kunne forstå rækkefølgen. Den samme flymodel bruges for alle boardingmetoderne for lettere at kunne sammenligne metoderne med hinanden.

I denne afhandling tages udgangspunkt i en flymodel, som indeholder 10 rækker sæder med 6 sæder per række. Der er en kabinegang, der deler sæderne ligeligt, med 3 rækker sæder på hver side af gangen. Der er altså 60 sæder på flymodellen. For simplicitets skyld har modellen kun en dør til flyet, som er placeret forrest i flyet.

Flymodellen har formen som kan ses på figuren herunder, og den vil blive udfyldt med tal, som definerer hvilken plads, der først vil blive optaget for de forskellige boardingmetoder.

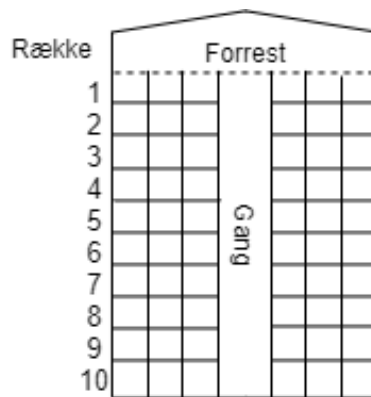


Figure 4: Den valgte flymodel til simulationer: 60 sæder fordelt på 10 rækker

5 Klassiske boardingmetoder

Der er flere såkaldte klassiske boardingmetoder, som vil blive præsenteret i dette afsnit. Flere af disse metoder er blandt de mest populære boardingstrategier, som flyselskaberne benytter sig af på grund af deres simple opbygning. Udgangspunktet for flyene i disse boardingmetoder er små fly med kun en kabinegang og en indgang til flyet, som er placeret i den forreste ende af flyet. Dermed boardes flyet direkte fra gaten ved en jetbro. Ved alle de simple boardingmetoder får passagerer i første klasse og passagerer med prioriteringsbilletter lov til at boarder flyet før passagerer med ordinære billetter.

Den mest simple boardingmetode kan betegnes som *Front-to-Back*. Alle passagerer boarder flyet fra den forreste dør i flyet og bevæger sig altså fra forreste ende af flyet til den bagerste del, hvorfor metoden har navnet Front-to-Back. Denne metode siges at være den mest langsomme måde at få passagerer til at boarder et fly og dermed den dårligste af alle metoder. En anden metode, der er næsten lige så langsom, er *Back-to-Front* som er stort set identisk med Front-to-Back bortset fra, at passagererne boarder flyet fra den bagerste ende af flyet til den forreste. Selvom disse to metoder er de dårligste, så bliver de i høj grad benyttet af flyselskaberne.

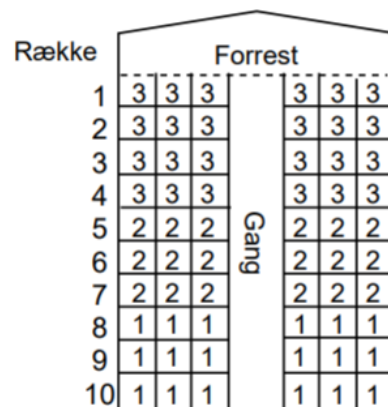


Figure 5: Back-to-Front metoden

Outside-in er en anden type metode, hvor passagerer med vinduesplads boarder flyet først, dernæst passagerer med midterste sæde og til sidst dem, der har pladser ud til midtergangen. Denne metode omtales også som *WilMA* eller *WMA* som står for *Window-Middle-Aisle*. Metoden er kun brugbar, hvis et fly har sæder placeret på en bestemt måde – ved tre eller to sæder på hver side af en midtergang. Mange flyselskaber ville kunne benytte sig af metoden, da rigtig mange fly har denne sædefordeling. Det er kun store fly med langdistance, som har flere sæder og en ekstra række.

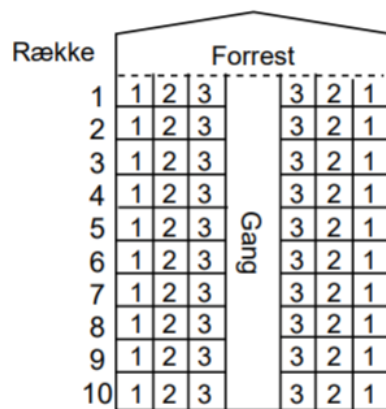


Figure 6: WMA metoden

Reverse Pyramid er en blanding af *Outside-in* og *Back-to-Front* metoderne, hvor passagerer bliver boardet diagonalt fra bagerste vinduessæder først og frem til de forreste sæderækker. Denne metode og *Outside-in* er gode, idet disse rækkefølger fjerner både gangforstyrrelser og sædeforstyrrelser.

Række	Forrest						
1	3	4	5	Gang	5	4	3
2	3	4	5		5	4	3
3	2	4	5		5	4	2
4	2	3	5		5	3	2
5	1	3	5		5	3	1
6	1	3	5		5	3	1
7	1	2	4		4	2	1
8	1	2	4		4	2	1
9	1	2	4		4	2	1
10	1	2	4		4	2	1

Figure 7: Reverse Pyramid metoden

Ved strategien *Rotating zone* grupperes passagerer i zoner, således at de går ombord på flyet foran først, så bagerst, derefter foran igen og så bagerst igen og så videre. Dermed boarder passagerer med pladser midt i flyet til sidst.¹⁹

By Group tillader flere passagerer at boarde på samme tid i grupper. Der defineres ofte 2 til 6 boardinggrupper. En gate medarbejder annoncerer disse grupper en efter en ved at kalde den respektive række, bogstav eller gruppenummer og beder dem om at boarde. Når den første gruppe er færdig med at boarde, bliver den næste gruppe kaldt og kan påbegynde boarding. Sådan fortsætter det indtil alle grupper og passagerer har boardet flyet. Inden for grupperne kan passagerne boarde tilfældigt.

Der findes forskellige andre typer af gruppe boardingstrategier. Der er f.eks. *By Block*, som er når passagerne boarder i blokke, og metoden *By half-Block*, som ses herunder, hvor de bagerste rækker bliver boardet først i en blok, dernæst de midterste og til sidst de forreste. Blokkene bliver delt af kabinegangen.

¹⁹Notomista, Selvaggio, Sbrizzi, Di Maio, Grazioso & Botsch, 2016

Række	Forrest						
1	3	3	3	Gang	6	6	6
2	3	3	3		6	6	6
3	3	3	3		6	6	6
4	3	3	3		6	6	6
5	2	2	2		5	5	5
6	2	2	2		5	5	5
7	2	2	2		5	5	5
8	1	1	1		4	4	4
9	1	1	1		4	4	4
10	1	1	1		4	4	4

Figure 8: By half-Block metoden

By Row er typen, hvor hver række er en gruppe, som bliver boardet på samme tid. *By half-Row* boarder ligesom *By Row* en række ad gangen, men hvor grupperne fordeles på hver side af kabinegangen, så der forekommer dobbelt så mange grupper.

Række	Forrest						
1	10	10	10	Gang	20	20	20
2	9	9	9		19	19	19
3	8	8	8		18	18	18
4	7	7	7		17	17	17
5	6	6	6		16	16	16
6	5	5	5		15	15	15
7	4	4	4		14	14	14
8	3	3	3		13	13	13
9	2	2	2		12	12	12
10	1	1	1		11	11	11

Figure 9: By half-Row metoden

Den sidste type er boardingmetoden *Random*, som er når alle passagerer boarder tilfældigt, og får lov til at boarde på samme tid. Passageren, der står forrest i boardingkøen får lov til at boarde som den første, uanset personens sædenummer. Den tilfældige metode bliver også benyttet af mange flyselskaber i dag og er i flere tilfælde hurtigere end de grupperede klassiske metoder.²⁰

²⁰Jaehn & Neumann, 2014

6 Mere komplicerede boardingmetoder

De klassiske boardingmetoder har sine fordele, da de er simple i deres opbygning. Der kræves dermed ikke meget af medarbejderne i luftfartselskaberne for at sikre overholdelsen af de boarding rækkefølger, som er angivet i boardingmetoderne. Metoderne er derimod ikke nødvendigvis de hurtigste boardingmetoder, hvorfor det er relevant at undersøge mere komplicerede boardingmetoder, som kan opnå bedre boardingresultater.²¹ Steffens metode samt en ny boardingmetode, som bygger på Steffens metode, vil blive undersøgt. De er metoder, der i højere grad kræver, at flyselskabernes personale styrer boarding, da metoderne kræver en højere grad af struktur.

6.1 Steffen, Optimal boarding method for airline passengers

Steffens metode er meget relevant at undersøge i forbindelse med passager boarding problemet. Han fandt ud af at noget af det, som tager lang tid ved boarding af et fly, er den tid folk bruger på at lægge deres håndbagage på en bagagehylde. Ved at lave en model, som tager hensyn til det problem, kunne han forkorte boardingtiden meget. Han påstår selv at have fundet den mest optimale boardingstrategi under visse antagelser, hvilket flere andre i litteraturen er enige i. Der er mange andre studier, som bruger Steffens metode til at sammenligne med eller som grundlag for deres egne metoder.

Steffens boardingmetode vil blive uddybet ud fra Steffens artikel *Optimal boarding method for airline passengers*.

Der er mange parametre, som er med til påvirke boardingtiden. Derfor opstiller Steffen en række antagelser for at specificere boardingmodellen. Den grundlæggende antagelse, er at størstedelen af den tid, det tager passagerer at boarde et fly, er den tid det tager passagerne at loade deres håndbagage. At loade håndbagage, er et begreb, som betyder at opbevare håndbagagen i bagagehylderne, som er placeret ovenover sæderne i et fly. Når der dertil bliver benyttet udtrykket loadetid, vises der tiden det tager at loade håndbagagen. Andre faktorer

²¹Notomista, Selvaggio, Sbrizzi, Di Maio, Grazioso & Botsch (2015)

såsom passagerer, som sidder på det forkerte sæde, eller som rejser sig efter de allerede har fundet deres plads, for f.eks. at hente noget, opfattes som ubetydelige. Flymodellen, som Steffen benytter sig af har 120 sæder, som er fordelt med 6 passagerer per række på 20 rækker. Flyet har ingen prioriterede siddepladser, og alle fly bliver fyldt helt op. I den teoretiske model får passagererne hver især tildelt et sæde og det antal tidstrin, som passageren har brug for at loade sin bagage, som er et tilfældigt tal mellem 0 og 100. Derudover er der også antagelser omkring den menneskelige natur. For det første kan en person ikke flytte sig medmindre, der er nok plads mellem personen selv og personen foran sig, og der skal i denne model være to rækker mellemrum mellem to personer. Passagerer skal bruge plads, svarende til en række, enten foran eller bagved for at loade deres bagage. Den sidste antagelse er, at passagerer kun loader deres bagage til bagagehylden, der er ovenover deres tildelte sæde. Modellen tager ikke højde for klyngedannelse, som kan opstå på grund af passagerer, der rejser med familier eller ledsagere, da passagerer ikke får lov til at boarde med deres medrejsende.

Steffen benytter sig af en optimeringsalgoritme og computersimulation for at finde en optimal boardingmodel. Først er der lavet en simuleringsalgoritme, som gennemfører boarding af passagerer, givet en oprindelig rækkefølge som passagerne skal følge. Tiden, som det tager passagerne at loade deres bagage, er sat af en tilfældig-tal-generator. Optimeringen af rækkefølgen starter dernæst ved at bytte rækkefølgen på passagerer. Helt konkret vil algoritmen foregå på følgende måde:

- Algoritmens udgangspunkt er, at der er blevet givet en rækkefølge for, hvordan passagerne skal boarde et fly. Tiden det tager at få boardet flyet bliver noteret
- Stadig med den første rækkefølge af passagerne bliver positionen af to tilfældige passagerer byttet og flyet boardes igen
- Hvis flyet boardes lige så hurtigt eller hurtigere end den forrige iteration, så accepteres den nuværende rækkefølge af passagerer, og der byttes position på yderligere tilfældige passagerer. Denne proces gentages

- Hvis den nuværende konfiguration boarder langsommere end den forrige, da afvises ændringen, og man returnerer til den forrige rækkefølge, og fortsætter processen fra det forrige udgangspunkt
- Alle tænkelige rækkefølger kan i teorien afprøves, men da det er alt for tidskrævende, bruges et simplere stoppekriterie, og algoritmen stoppes efter approksimativt 10.000 iterationer, idet yderligere forsøg ikke vil have en signifikant påvirkning på resultatet

Algoritmen finder dermed kun et lokalt minimum, idet alle mulige optimale rækkefølger ikke testes. Mange konfigurationer har samme boardingtid eller er så tæt på hinanden, at forskellen i boardingtiden ikke er vigtig. Det er derfor mere relevant at opstille en gruppe af konfigurationer, som er ækvivalent med den optimale rækkefølge. Der er f.eks. ingen forskel på boardingtiden, hvis to passagerer, som begge har vinduesæde i samme række bytter plads, men der er forskel, hvis man bytter to tilfældige passagerer.

Steffen opdagede, at sædenummerene af to nærliggende passagerer er mindre vigtigt end, hvor langt de to passagerer sidder fra hinanden. Dette Resultat er fundet ud fra den såkaldte *sædefordeling*, som er forskellen i sædenummer mellem tilstødende passagerer. Med de antagelser, som blev præciseret i starten af afsnittet får modellen en sædefordeling, som er illustreret i figur 10. Der kan dog være mange optima, og det afhænger af, hvilke antagelser der er omkring boarding. Resultatet er opnået ved 100 realiseringer af boardingscenariet, idet loadetiden er stokastisk, hvorfor der skal laves tilpas mange realiseringer for at få et retvisende resultat.

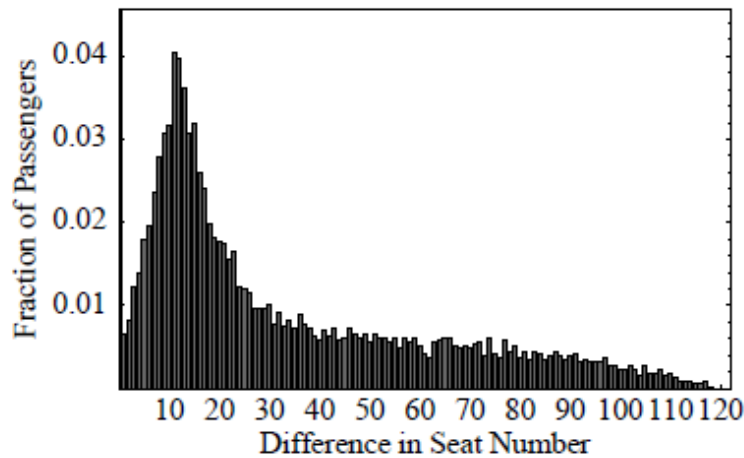


Figure 10: Eksempel på sædefordeling (Steffen, 2008)

Det værd at bemærke, at optimummet for fordelingen er omkring sædenummer 12, hvilket er ækvivalent med en passager, som skal bruge 2 pladser (sin egen plads og en foran eller en bagved) for at load sin bagage. Derudover er sædefordelingen symmetrisk omkring optimummet, hvilket skyldes, at en passager skal bruge pladsen enten foran eller bagved sig til at lægge deres bagage i bagagehylden.

Sædefordelingen ændrer sig, hvis der bliver ændret på antagelserne for modellen, hvilket mere præcist betyder, at optimummets placering, højde og bredde kan ændres, hvis parametrene for flymodellen ændres.

- Placeringen af optimum svarer til afstanden, som det kræver for en person at load sin bagage. Hvis passagerer f.eks. kræver tre rækker af plads til at load sin bagage (inklusive sin tildelte række), så skifter optimummet til at være omkring sædenummer 18
- Bredden på optimummet relaterer sig til antallet af sæder per række. Det betyder, at hvis der f.eks. er 4 sæder per række, så vil bredden være smallere end eksemplet i figur 10
- Højden af optimummet bliver påvirket af, passagerers loadetid. Hvis passagerer loader deres bagage øjeblikkeligt, da vil der ikke være noget optimum. Højden af optimummet er ultimativ, når den gennemsnitlige loadetid nærmer sig den tid det tager at gå længden på

flyet. Det betyder, at hvis det tager signifikant længere tid for en typisk passager at gå længden på flyet end det gør for passageren at loade sin bagage, så er det ikke så vigtigt, at passagerer boarder flyet i en bestemt rækkefølge

Steffens optimale boardingmetodes robusthed testes, da det er relevant at undersøge om det er praktisk at boarde et fly ved Steffens metode, hvor passagerer går ind i flyet i en bestemt rækkefølge. Metodens robusthed testes på to forskellige måder, først ved at ændre fordelingen af passagerers loadening af bagage vælges, og den anden er at lave tilfældige ændringer til rækkefølgen, som passagerer boarder flyet med.

Ved ændring af fordelingen på loadetiden blev flere fordelinger testet²² og uanset, hvilken fordeling, som blev benyttet, var det statistisk ikke muligt at se forskel på resultaterne. Tiden, som det kræver at boarde et fly, bliver altså ikke påvirket af, hvilken type fordeling som bliver benyttet, hvilket også giver mening, da boardingtiden hovedsageligt afhænger af den gennemsnitlige loadetid for bagage.

Når ændringen af rækkefølgen, som passagerer boarder flyet i, testes, da testes både det at skifte placering af flere tilfældige par af passagerer, og det at skifte hele rækker med et tilfældigt antal (flytte folk fra enden af rækken til fronten). At lave tilfældige skift i rækker har ikke en signifikant påvirkning på boardingtiden. Alle passagerer holder stadig samme afstand, og samme antal passagerer kan finde deres plads i flyet. Starttidspunktet for boardingprocessen kan dog ændre sig lidt. Derimod kan det have en signifikant betydning for boardingtiden at bytte et par passagerers placering. Ved at bytte rundt på 10% af passagerne, så er dele af rækkenfølgen blevet tilfældig, og boardingtiden vil stige med 20%.

Resultatet af Steffens studie viser, at boardingtiden kan reduceres dramatisk ved at boarde passagerer på en måde, så flere passagerer kan loade deres bagage simultant. Det gør han ved at sprede passagerer igennem længden af flyet i stedet for at koncentrere dem et bestemt sted i kabinen.

Ved at benytte Steffens metode bliver passagerne boardet i den rækkefølge som figur 11 illus-

²²bl.a. uniformfordeling, normalfordeling eksponentielfordeling (alle med samme middelværdi)

trerer. Det er ikke alle tal, som er indsat i modellen, da de tal som indtil videre er indsat burde give det fulde billede af boardingteknikken. Metoden har sat passagerne i kø i en forudbestemt rækkefølge, der boarder passagerne fra bagsiden af flyet til fronten og fra vinduerne til midtergangen. Det bliver dermed en blanding af WilMA og Back-to-Front metoderne. Det vil sige, at den første passager, som boarder flyet, har fået tildelt vinduesædet i den sidste række, hvor mærket 1 er indsat i den nedenstående figur. Tilstødende passagerer sidder to rækker foran den forrige passager, og processen fortsætter for den ene side af flyet og gentager sig derefter på den anden side. Den sidste passager, der boarder flyet, vil dermed sidde på den forreste gangplads. Rækkefølgen er under antagelse, at intet er kendt på forhånd omkring antallet af håndbagage for den individuelle passager.

Række	Forrest				
1	20				15
2	10				5
3	19				14
4	9				4
5	18				13
6	8			23	3
7	17				12
8	7			22	2
9	16				11
10	6			21	1

Figure 11: Visuel simulation af Steffens metode

6.2 En ny boardingmetode

Milne og Kelly har udviklet en ny boardingmetode, hvor de benytter sig af Steffens boardingsekvens. Denne metode vil blive undersøgt med udgangspunkt i artiklen *"A new method for boarding passenger onto an airplane"*. Milne og Kelly tager blot højde for at tildele passagerer til deres sæde, så passagerens håndbagage er ligelig fordelt igennem flyet, dvs. passagerer ikke selv kan bestemme hvor de skal sidde.

Det er vigtigt at tage højde for mængden af håndbagage, som passagerne medbringer på flyet, ligesom Steffen også fandt ud af. I 1970 kunne flyselskaberne boarder omkring 20 passagerer i

minuttet, men i 1998 var denne rate faldet til omkring 9 passagerer i minuttet. Dette skyldtes, i følge Milne og Kelly, at mængden af håndbagage steg markant. Mængden af håndbagage er steget i takt med, at det er blevet dyrere at medbringe bagage på flyverejser, og miniferier er også blevet populært, og dermed vælger mange passagerer kun at medbringe håndbagage på deres rejser.

Det er altså vigtigt at have fokus på håndbagage, når boardingstrategier skal vælges. Steffens boardingmetode virker til at være optimal med en antagelse af, at mængden af håndbagage er ukendt. Steffens metode har igennem flere undersøgelser vist sig at være betragteligt bedre end flere andre metoder, som bl.a. metoden Random, hvorfor Milne og Kellys nye metode vælger at bygge på Steffens metode. Nøgleaspektet af denne nye metode er, at passageres håndbagage er ligelig fordelt i flyet, sådan at passagerer ikke skal bruge lang tid på at fordele og finde plads til deres håndbagage. Flyet, som metoden bruges i undersøgelsen, er et fly med 20 rækker og 6 sæder per række med en kabinegang. Der er dermed plads til 120 passagerer på flyet. Den nye metode har 4 trin for at kunne tilfredsstille dette aspekt, som kort kan opsummeres ved følgende

1. Tildel en mængde håndbagage til alle rækker
2. Tildel en mængde håndbagage til hvert sæde i en række
3. Tildel passagerer til sæder som matcher deres antal bagage (fra step 2)
4. Passagerer boarder ifølge Steffens metode

Ved step 1 tildeles to-tasker-, en-taske- og ingen-taske-passagerer til hver af flyets rækker for at fordele håndbagagen ud gennem hele flyet. Det betyder, at en passager får tildelt et sæde ude fra den mængde håndbagage vedkommen har medbragt. Tildelingen foregår ved, at først tildeles passagerer, der bærer to tasker til en række, derefter dem der bærer en taske og til sidst dem uden en taske. To-taske-passagerer bliver placeret i rækker, sådan at de er fordelt approksimativt ligeligt igennem hele flyet. Efterfølgende bliver passagerer med en taske tildelt til rækker, som har færrest bagage og igen bliver de approksimativt ligeligt fordelt igennem flyet. Til sidst vil passagerer uden håndbagage få de sidste pladser. Resultatet ved det første step kan ses til venstre i figur 12.

Step 1									
Række	Forrest						Gang		
1	2	1	1				1	0	0
2	2	1	1				1	0	0
3	2	2	1				0	0	0
4	2	1	1				1	0	0
5	2	1	1				1	0	0
6	2	1	1				0	0	0
7	2	1	1				1	0	0
8	2	2	1				0	0	0
9	2	1	1				1	0	0
10	2	1	1				0	0	0

Step 2									
Række	Forrest						Gang		
1	1	1	0				0	0	2
2	2	1	0				0	1	1
3	1	1	0				0	1	2
4	2	1	0				0	1	2
5	1	1	0				0	0	2
6	2	1	0				0	1	1
7	1	1	0				0	0	2
8	2	1	0				0	1	2
9	1	1	0				0	0	2
10	2	1	0				0	1	1

Figure 12: Boarding efter step 1 (venstre) og efter step 2 (højre)

Ved step 2 bliver bagagen fordelt ligeligt mellem den højre og venstre side af rækkerne, hvilket medfører, at passagerer med mest håndbagage boarder flyet først passagerer, dernæst passagerer med mindre eller ingen bagage. Resultatet af step 2 kan ses til højre i figur 12. Herfra kan det observeres, at antallet af tasker på begge sider af gangen er skiftevis to eller tre, sådan at række 1 og 3 har to tasker på den ene side af gangen og tre tasker på den anden side af gangen. Omvendt er det for lige rækkeenumre. Derudover bliver passagerer med mest bagage tildelt sæder tættest på vinduerne, fordi vinduespladserne boarder flyet først. Dette betyder, at passagerer med 2 stykker håndbagage let kan finde plads til deres tasker.

Step 3 tildeler vilkårligt en individuel passager med et specificeret antal håndbagage til et sæde, som er allokeret til det bestemte antal håndbagage.

Til sidst, i step 4, boarder passagerer ligesom Steffens metode. Her bliver passagerer blot tildelt sæder baseret på det antal bagage, de har med ved hjælp af step 1-3.

Denne nye boardingmetode er blevet simuleret og sammenlignet med Steffens metode. Simuleringsmodellen, som testes, har parametrene, som er vist i nedenstående tabel.

Parameter	Værdi
Flyegenskaber (rækker, sæder per række, gang)	(20, 6, 1)
Hvor mange % flyet er fyldt op	100%
Tid-fra-en-række-til-den-næste (min, gnm, maks) i sekunder	(1,8, 2,4, 3)
Tid-at-sidde-uden-forstyrrelser (min, gnm, maks) i sekunder	(6, 8, 10)

Tid-fra-en-række-til-den-næste bliver også betegnet som *row-to-row* tid og repræsenterer, hvor lang tid det tager en passager at bevæge sig fra en række i flyet til den næste. Tid-at-sidde-uden-forstyrrelser parameteren repræsenterer den tid, det tager en passager at sætte sig efter at være ankommet til sin række og lagt sin håndbagage væk.

Modellen antager, at der er en bagagehylde på hver side af flyet, og at hver bagagehylde har uendelig mængde af plads. Modellen tager dog hensyn til, at når bagagehylden fyldes med bagage, så tager det længere tid at fylde den yderligere op.

Gennemsnitstiderne efter at have kørt simuleringen 5.000 gange er vist i figur 13. Det kan ses fra tabellen, at den samlede gennemsnitstid at boarde et fly for den nye metode er omkring 1%-3% hurtigere end Steffens metode. Dette svarer til en gennemsnitlig reduktion på 0,16 minutter i boardingtiden. Det lyder muligvis ikke af meget, men det kan medføre store økonomiske besparelser for et flyselskab. Flyselskaber har approksimativt en omkostning på \$ 30 per minut, så et flyselskab kan spare flere millioner om året, hvis de har en stor flyflåde.

Probability customer carries			Time to board		
0 Bags	1 Bag	2 Bags	Steffen	Proposed	% Improvement
10%	60%	30%	8.02	7.84	2.3%
20%	50%	30%	7.97	7.76	2.6%
30%	50%	20%	7.72	7.49	3.0%
40%	40%	20%	7.66	7.43	3.0%
50%	40%	10%	7.41	7.28	1.7%
60%	30%	10%	7.35	7.22	1.8%
70%	20%	10%	7.30	7.19	1.5%
80%	10%	10%	7.24	7.16	1.1%

Figure 13: Sammenligning af Steffens og den nye metode (Milne & Kellys, 2013)

For at få den nye metode til at virke må flyselskaberne have information omkring den mængde håndbagage hver passager medbringer. Denne information er mulig at få hvis flyselskabet opkræver gebyrer for håndbagage. Hvis flyselskabet ikke vil opkræve gebyrer, kan de bruge data fra forrige flyvninger til at estimere andelen af håndbagage. For eksempel en passager, der flyver mandag morgen og returnerer samme dag / nat, forventes at have mindre håndbagage med, end en passager, der flyver samme mandag morgen, og vender tilbage fire dage senere uden indtjekning af bagage.

7 Komplicerede boardingmetoder - flere aspekter

Boardingmetoderne, som indtil videre er blevet udforsket, tager ikke hensyn til mange af de faktorer, som kan forstyrre boardingprocessen og dermed også forringe fordelene ved de undersøgte boardingstrategier. Derudover antager alle boardingmetoderne, at passagerne boarder deres fly igennem en dør og direkte fra gaten via en jetbro. Mere komplicerede boardingmetoder må undersøges, for at studere boardingmetoder, som indeholder flere aspekter ved boarding.

En boardingmetode, hvor flyselskaber tillader passagerer at boarde fly på landingsbanen og dermed gennem to døre, undersøges. Boardingmetoden benytter transferbusser til at transportere passagerne fra gaten til flyet. Det undersøges også når en andel af passagerer på et fly har betalt for prioriteringsboarding, og når passagerer ikke overholder reglerne som er givet ved boardingstrategierne.

7.1 Transferbus metode

Udgangspunktet for de forrige boardingmetoder, som er blevet belyst i afhandlingen, har været, at passagerne boarder flyet direkte fra terminalen, hvor en jetbro forbinder flyet med terminalen. Jetbroer begrænser boarding til at man kun kan boarde fra en dør i stedet for to døre på samme tid. Hvis ikke et fly boardes ved en jetbro så, da sker det på startbanen, hvor man kan gå til flyet eller tage en transferbus. Mange flyselskaber, vælger derfor at boarde deres passagerer direkte på startbanen, da de kan udnytte begge døre. Det er dermed også væsentligt at belyse boardingproblemet i tilfælde hvor transferbusser bliver benyttet.

Transferbusser er designet til at blive brugt i lufthavne og medbringe passagerer på en kort tur. Busserne er bredere og har færre sæder end normale busser. Der er ofte to indgange i bussen (en forrest og en bagerst).

Metoden, som vil blive analyseret til dette formål, er beskrevet i artiklen *"Airplane Boarding method for passenger groups when using Apron buses"*, og dette afsnit bygger også på artiklen.

Metodens formål er stadig at reducere boardingtiden, mens der tages højde for passagerers sædearrangement. Boardingbeslutningen indeholder nu også beslutningen om hvilke passagerer,

som skal tildeles til hvilen bus.

Den forslåede metode bruger mixed integer programmering (MIP) til at tildele passagerer til en bestemt bus, for at opnå den bedst mulige boardingtid. Boardingproblemet med transferbusser er også tidligere blevet forsket i, og den mest optimale metode til at løse problemet blev vurderet til at være Mixed-WilMA-RP metoden. Det lange navn på boardingmetoden kommer fra, at metoden er en blanding (mixed) af WilMA og Revers Pyramid (RP) metoderne. I den tidligere forskning, hvor Mixed-WilMA-RP metoden har været undersøgt, blev der ikke taget højde for passagerer, som rejser i grupper, som er tilfældet i denne undersøgelse, hvorfor metoden er relevant at analysere igen, hvor gruppe boarding er mulig.

Mixed-WilMA-RP metoden udvælger hvilke passagerer, som skal tildeles til hver bus ved en blanding af WilMA og Reverse Pyramid. Passagerne vil dermed tildeles til transferbusser som figur 14 illustrerer.

Metoden har flere antagelser, som er vigtige for at kunne opstille modellen. Flyet har plads til 180 passagerer, og det fyldes helt op. Flyet har derudover 2 døre, en i front og en bagerst. Der benyttes to busser til at transportere passagerne fra terminalen til flyet, og et lige antal passagerer tildeles til hver bus, altså 90 passagerer per bus. Der tages højde for, at passagerer rejser i grupper og dermed har siddepladser tæt på hinanden og gerne boarder flyet sammen. Passagerer, som rejser i grupper, vil derfor blive placeret i samme transferbus. Alle passagerer, som er tildelt et sæde i række 1-15 på flyet boarder igennem den forreste dør, og passagerer med pladser i række 16-30 boarder igennem den bagerste dør af flyet. Grupper og individuelle passagerer, som er tildelt en bestemt transferbus, boarder flyet i en tilfældig rækkefølge.

MIP kan nu opskrives og objektfunktionen er

$$\begin{aligned} \max & \left(\sum_{r \in R} \sum_{g \in G} (W A_r \cdot W_{gr}^a + W B_r \cdot W_{gr}^b) \cdot X_{g1} + (A A_r \cdot A A_{gr}^a + A B_r \cdot A_{gr}^b) \cdot X_{g2} \right) \\ & - \left(\left(\sum_{r \in R} \alpha s_r \cdot S_r + \alpha e_r \cdot E_r \right) + 0,05 \cdot (F + Z) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

hvor g , b og r beskriver henholdsvis passagergrupper, busser og rækker i flyet. W_{gr} beskriver antal vinduesædepassagerer i en gruppe. Parameteren W_{gr}^a beskriver passagerer som støder op til en

midtersædepassager som ikke er en del af samme gruppe, og W_{gr}^b beskriver passagerne som støder op til en midtersædepassager, som er en del af samme gruppe, men midtersædepassagerne støder op til en passager i gangsæde, som ikke er en del af gruppen. Tilsvarende gælder for gangsædepassagerer, som er beskrevet ved A_{gr} . Forekomster af de forskellige typer passagerer bliver belønnet med vægtene WA_r , WB_r , AA_r og AB_r . Antallet af passagerer i række r , som burde tildeles til den første bus er beskrevet som et mål $Target_r$, hvor vægtene αs_r og αe_r straffer, hvis målet ikke opnås eller overskides. S_r er antallet af mangler og E_r er antallet af overskridelser for $Target_r$. F indikere hvor mange flere passagerer fra første halvdel af flyet (række 1-15), som er i den første transferbus, i forhold til passagerer fra den bagerste del af flyet. Z beskriver hvor mange færre passagerer.

Problemet har følgende bibetingelser

X_{gb} er en binær variabel, som er 1, hvis gruppe g er tildelt til bus b og 0 ellers:

$$X_{gb} \in 0, 1 \quad (3)$$

Hver gruppe er tildelt til en bus:

$$X_{g1} + X_{g2} = 1 \quad (4)$$

Det samme antal passagerer er tildelt til hver bus:

$$\sum_{g \in G} N_g \cdot X_{g1} = \sum_{g \in G} N_g \cdot X_{g2} \quad (5)$$

hvor N_g er antal passagerer i gruppe g

Mangler (S_r) og overskridelser (E_r) af antallet af passagerer i hver række r tildelt til første bus ($\sum_{g \in G} NR_{gr} \cdot X_{g1}$), når det sammenlignes med $TARGET_r$:

$$\sum_{g \in G} NR_{gr} \cdot X_{g1} = TARGET_r - S_r + E_r \quad \forall r \in R \quad (6)$$

hvor NR_{gr} er antallet af passagerer fra gruppe g , som sidder i række r

Sikre symmetri for første og anden bus:

$$\sum_{r \in 1 \dots 15} \sum_{g \in G} NR_{gr} \cdot X_{g1} = \left(\sum_{r \in 16 \dots 30} \sum_{g \in G} NR_{gr} \cdot X_{g1} \right) + (F - Z) \quad (7)$$

Og til sidst ikke-negative betingelser

$$E_r \geq 0 \quad \& \quad S_r \geq 0 \quad \forall r \in R \quad (8)$$

$$F \geq 0 \quad \& \quad Z \geq 0 \quad (9)$$

Alle parametrene, som beskriver MIP er grundigt beskrevet i bilag A. Boardingmetoden Mixed-WilMA-RP tildeler alle vinduesædepassagerer til den første bus og (næsten) alle gangsædepassagerne til den anden bus. I tilfældet hvor tre passagerer i samme gruppe sidder ved vindue-, midt- og gangsædet i en bestemt række og samme side af et fly, er der intet eksplicit incitament i objektfunktionen (udover værdierne af s_r og e_r) til at tildele de tre passagerer til hverken den første eller anden bus. Hvis en vinduesædepassager ikke sidder ved siden af et gruppemedlem, vil der foretrækkes at tildele passageren til den første bus (ligesom Mixed-WilMA-RP foreslår).

Fordelingen af sæder ved brug af metoden Mixed-WilMA-RP har også antagelser, der skal tages højde for, inden modellen kan testes. Grupper af passagerer (og gruppens størrelse), som skal tildeles et sæt af sæder er valgt tilfældigt. Fordelingen af sæder bliver lavet ud fra en prioriteret boarding rækkefølge, der har følgende trin

- Hver gruppe vil have alle dens medlemmer enten sidder forrest (blandt række 1-15) eller bagerst (blandt række 16-30) i flyet
- Forfordeler tildelingen af en gruppe til så få rækker som mulig
- Forfordeler tildeling for, hvor mange passagerer i en gruppe, der har sæder stødende op til andre passagerer i samme gruppe.

- Forfordeler en gruppe passagerer til rækker, som er tæt på fronten af flyet
- Hvis to fordelinger af sæder er lige gode så vælges de tilfældigt.

Passageren kan have følgende antal af håndbagage med op i flyet; ingen bagage, 1 lille taske, 2 små tasker, 1 stor taske, 1 stor og en 1 lille taske.

Ved hjælp af simuleringer og en agent-baseret model, som er lavet i NetLogo testes præstationen af den opstillede MIP model. Alle resultater for denne metode er testet mod en baseline boardingmetode, som minder om Back-to-Front. Baseline metoden forsøger, at tildele de grupper af passagerer, som sidder tættest på midten af flyet, til den første bus og de resterende passagerer til den anden bus, så hver bus stadig har 90 passagerer.

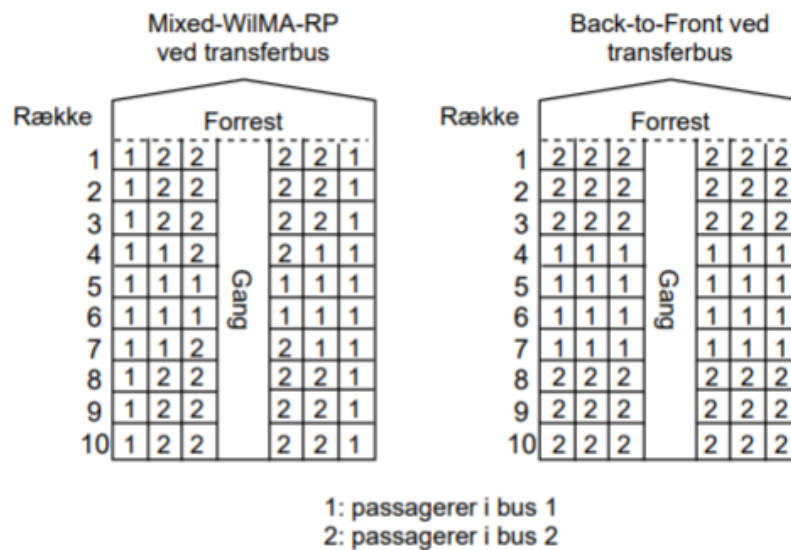


Figure 14: Sekvens for Mixed-WilMA-RP og Back-to-Front metoderne

Forskellige boardingscenarier testes, hvor scenarierne differentieres på mængden af håndbagage og størrelsen på passagergrupper. Gruppescenarier er inddelt i 7 fra GS1 til GS7, som det illustreres i nedenstående tabel.

Gruppescenarier	1	2	3	4	5	6
GS1	20%	20%	20%	15%	15%	10%
GS2	30%	20%	18%	12%	10%	10%
GS3	40%	18%	15%	10%	10%	7%
GS4	50%	16%	12%	8%	8%	6%
GS5	60%	14%	10%	7%	5%	4%
GS6	70%	10%	8%	5%	4%	3%
GS7	80%	6%	6%	4%	2%	2%

På samme måde er fordelingen af antallet af håndbagage, som passagerne medbringer vist i nedenstående tabel.²³

Bagagescenarie	0 tasker	1 lille taske	2 små tasker	1 stor taske	1 stor og 1 lille taske
LS1	10%	10%	0%	10%	70%
LS2	15%	20%	5%	10%	50%
LS3	25%	20%	10%	15%	30%
LS4	35%	25%	10%	15%	15%
LS5	60%	10%	10%	10%	10%
LS6	80%	5%	5%	5%	5%
LS7	100%	0%	0%	0%	0%

Simuleringsresultaterne for baseline metoden og den foreslåede metode er illustreret i figur 15. boardingtider er vist for de forskellige bagage- og gruppescenarier.

²³Tabellerne er også illustrerede i Milne, Cotfas, Delcea, Saleri, Cráciun & Moláneseu, 2020

Scenario	Group boarding method	Luggage Situations						
		LS1	LS2	LS3	LS4	LS5	LS6	LS7
GS1	Benchmark: Baseline Method	434.4	379.2	336	296.4	265.2	236.4	183.6
	Proposed Method	396	344.4	303.6	267.6	238.8	208.8	153.6
GS2	Benchmark: Baseline Method	442.8	391.2	342	302.4	276	242.4	190.8
	Proposed Method	398.4	351.6	307.2	270	243.6	211.2	160.8
GS3	Benchmark: Baseline Method	446.4	394.8	350.4	312	278.4	250.8	200.4
	Proposed Method	399.6	350.4	310.8	270	243.6	217.2	166.8
GS4	Benchmark: Baseline Method	454.8	405.6	361.2	324	286.8	262.8	211.2
	Proposed Method	396	352.8	313.2	278.4	242.4	222	172.8
GS5	Benchmark: Baseline Method	462	414	370.8	328.8	301.2	273.6	229.2
	Proposed Method	400.8	358.8	320.4	279.6	254.4	226.8	181.2
GS6	Benchmark: Baseline Method	464.4	421.2	376.8	340.8	312	280.8	238.8
	Proposed Method	398.4	357.6	319.2	285.6	259.2	228	183.6
GS7	Benchmark: Baseline Method	472.8	427.2	391.2	351.6	328.8	298.8	259.2
	Proposed Method	399.6	358.8	320.4	286.8	262.8	235.2	188.4

Figure 15: Simuleringsresultater som viser boardingtid i sekunder (Milne, Cotfas, Delcea, Saleri, Cráciun & Moláneseu, 2020)

Simuleringsresultaterne indikerer, at den foreslåede metode resulterer i en forbedring af den samlede boardingtid på op til 27,31% sammenlignet med baseline metoden. Den foreslåede metode resulterer i hurtigere gennemsnitlige boardingtider i alle betragtede tilfælde. Tidsforbedring varierer mellem 26,4 og 73,2 sekunder pr. fly. I betragtning af de gennemsnitlige omkostninger ved boardingforsinkelse på \$ 53,5 pr. minut, ved at overveje alle de bagage- og gruppesituationer, kan en gennemsnitlig omkostningsreduktion på op til \$ 65,27 pr. fly opnås, når den foreslåede metode er anvendt i stedet for baseline metoden.

Antallet af sædeforstyrrelser reduceres også, når den foreslåede metode anvendes sammenlignet med baseline metoden, hvilket kan være med til at forklare den reducerede gennemsnitlige boardingtid.

Fra passagerernes synspunkt er den foreslåede metode i overensstemmelse med, at de gerne vil gå ombord på en bus med deres gruppemedlemmer og sidde tæt på hinanden i flyet. Forskellige andre gruppescenarier, som er illustreret i nedenstående tabel, er blevet studeret for den foreslåede metode og baseline metoden. Tabellen indeholder grupper i størrelsen 1 til 6.

Gruppescenarie	1	2	3	4	5	6
G1-SG1	20%	16%	16%	16%	16%	16%
G1-SG2	40%	12%	12%	12%	12%	12%
G1-SG3	60%	8%	8%	8%	8%	8%
G1-SG4	80%	4%	4%	4%	4%	4%
G1-SG5	100%	0%	0%	0%	1%	1%

Boardingmetodernes gennemsnitlige boardingtid for hvert af disse gruppescenarier er vist i figur 16. Den forslåede metode er hurtigere, uanset hvilken gruppesammensætning der testes. Så udover at den forslåede metode opfylder passagerens ønske om gruppedannelse, så opfylder boardingmetoden også flyselskabets ønske om hurtigere boardingtider.

Group boarding method	Scenario				
	G1-SG1	G1-SG2	G1-SG3	G1-SG4	G1-SG5
Benchmark:					
Baseline Method	181.2	195.6	219.6	252	303.6
Proposed Method	152.4	159.6	170.4	184.8	196.8

Figure 16: Gennemsnitlige boardingtider for gruppescenarier (Milne, Cotfas, Delcea, Saleri, Cráciun & Moláneseu, 2020)

Den forslåede metode er dermed mere effektiv end baseline metoden for alle de testede scenarier. En begrænsning af metoden er dog, at det antages, at alle passagerer i en gruppe vil sidde i den samme halvdel af flyet (enten i række 1-15 eller i række 16-30). Denne antagelse fungerer ikke nødvendigvis i praksis, fordi der kan være grupper, der indeholder passagerer, der sidder tæt på hinanden men i forskellige rækker af flyet (f.eks. en gruppe med passagerer, der sidder både i række 15 og række 16).

7.2 Prioritetsboarding

Uanset hvilken effektiv boardingstrategi flyselskabet vælger, kan den blive forstyrret af flyselskabernes udbud af prioriterings billetter. Passagerer med prioriterede billetter får lov til at gå ombord på flyet som de første og boarder i en tilfældig rækkefølge, hvilket medfører, at kabinegangen kan blive blokeret flere steder. Det er derfor relevant at undersøge, hvilken påvirkning antallet af prioriterede passagerer har for forskellige almindelige boardingstrategier. Dette gøres i artiklen *"Resilience of passenger boarding strategies to priority fares offered by airlines"* af Tomasz Kisiel, som dette afsnit bygger på.

Det primære koncept i modellen er baseret på en passageropdeling i 2 grupper, hvor de 2 grupper har hver deres boardingstrategi. Den første gruppe består af passagerer, der har prioritetsbilletter, og som boarder flyet først. For denne gruppe gælder Random boardingstrategi. Den anden gruppe består af passagerer, som har standardbilletter, og disse passagerer kan først gå ombord efter den prioriterede gruppe. Boardingstrategien for denne gruppe kan vælges blandt allerede definerede boardingstrategier, og helt konkret testes boardingmetoderne Back-to-Front, By half-Block, By Row, By half-Row, Outside-in og Steffen.

Skalaen af problemet er blevet undersøgt i et studie, som blev lavet i Wrocław lufthavn, hvor antallet af passagerer med prioritetsbilletter blev undersøgt. Dataene var indsamlet for 6 udvalgte lavprislejerselskabers destinationer. Studiet viste, at der i alt var gennemsnitligt 47 passagerer med prioritetsbilletter i 181 fly, som hver indeholder 180 passagerer. Der var dog stor variation, da der var mellem 13 og 90 passagerer, som havde prioritetsbilletter.

En algoritme lavet for metoden, og den tester ved simulering boardingmetodernes boardingtider. Algoritmen arbejder i et loop. Dette loop tjekker om passagerer kan flytte sig, og om passagerens håndbagage kan blive loadet. Passagerer med standardbilletter står i kø i henhold til den antagne boardingstrategi. Modellen implementerer parallelle algoritmer for passagerbevægelser for hver passager. Modellen slutter, når hver passagers bevægelsesalgoritme er afsluttet.

Modellen er udviklet til et fly med 180 passagerpladser. Passagerer genereres ved simuleringen

i indgangsstedet i begyndelsen af simuleringen. Hver passager tildeles et sæde efter en uniform fordeling. Modellen blev udviklet til lavpris luftfartsselskaber, der kun tilbyder økonomiklasse. Prioriterede billetter tillader dermed passagerer at købe ethvert sæde ombord på flyet, og dermed kan prioriterede passagerer blokere gangen langs hele kabinen. En uniform fordeling er også blevet brugt til at tildele et sæde i række og kolonne af flykabinen til prioriterede passagerer. Passagerer bevæger sig ned gennem kabinegangen til deres tildelte sæde.

Der formodes i modellen, at der er to årsager til, at passagerer oplever kø i kabinegangen. Den første er, hvis passageren skal sætte sin håndbagage på plads, og den anden er, hvis der forekommer gangforstyrrelser.

Det antages, at passagerer lægger deres håndbagage på plads over den tildelte række, medmindre der er optaget. I dette tilfælde er det tilladt at begynde at indsætte bagage i skabet op til 4 gangplaceringer tilbage fra ens eget tildelte sæderække.

Gangforstyrrelser er den anden situation, hvormed passagerer står stille på en gangplads. Dette kan forekomme ved kø, eller hvis passageren venter på at komme forbi en anden passager, som er i færd med at loade sin bagage, eller hvis et gangsæde blive optaget før midtersædet eller vinduesædet.

Den samlede ventetid ved indgangen til og i gangen af kabinen kan beregnes fra ligning 10.

$$t_i = t_i^e + \sum_{ap=1}^j t_i^{ap} \quad (10)$$

Hvor t_i^e er ventetiden for boarding ved indgangslokationen for den i -te passager, og t_i^{ap} er tiden som et område i flyet (ap) er optaget af den i -te passager. j er rækken, som passageren går hen mod. Hele simuleringen slutter, når sidste passager sætter sig. Varigheden af hele boardingprocessen bliver den maksimale værdi, som er opnået fra ligning 10 og kan beskrives ved ligning 11

$$t_{board} = \max(t_{t=1}, \dots, t_n) \quad (11)$$

hvor n er total antal af passagerer.

Seks strategier for passagerer med standardbilletter er blevet udvalgt, for at teste modellen. Modstandsdygtigheden for strategierne testes, og skal forstås som evnen til at opretholde den forventede eller forbedre procestiden af en passagerboarding rækkefølge. Resultaterne for strategiernes modstandsdygtigheds vises i figur 17.

I grafen repræsenterer Y-aksen den procentvise ændring af, hvor mange prioriterede passagerer, der er ombord. Hvis denne værdi er negativ, betyder det, at boardingtiden er faldet efter at have delt passagerne op i de to grupper. Hvis værdien er positiv, er resultatet dårligere end den, der ville være med ingen prioriterede passagerer.

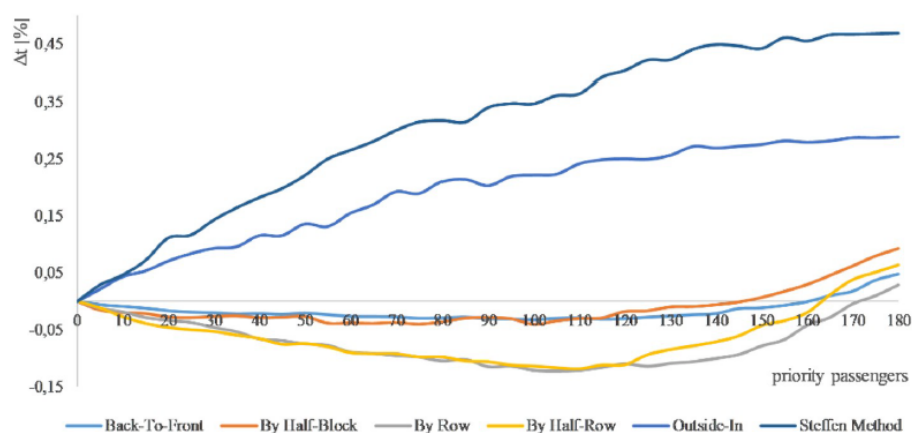


Figure 17: Modstandsdygtighed ved boardingstrategier (Kisiels, 2020)

Det er tydeligt fra figuren, at strategierne Outside-in og Steffens metoden er sårbare over for ethvert antal af prioriterede passagerer. Når antallet af prioriterede passagerer stiger fra 0 til 180, stiger den forventede procestid for Steffen metoden med 45% og 25% for Outside-in. Metoderne er så følsomme over for afbrydelse af den forudbestemte rækkefølge, at selv det mindste antal prioriterede passagerer øger procestiden. De resterende testede metoder er robuste inden for et bestemt antal prioriterede passagerer. Det ses dog, at når der er omkring 145 prioritetspassagerer, da begynder alle metoder at være sårbare, hvilket ikke er overraskende, for med så mange prioriterede passagerer er processerne næsten som en Random strategi. En hybrid af en metode med prioritetspassagerer og andre strategier kan give, kortere boardingtid.

Modstandstesten giver kun mulighed for at analysere, om en strategi er følsom over for

forstyrrelser. Testen tillader ikke at bedømme, hvilken metode der er den bedste. Derfor er det også relevant at kigge på den samlede boardingtid, som er illustreret i figur 18. Der er den samlede varighed af processen vist på Y-aksen.

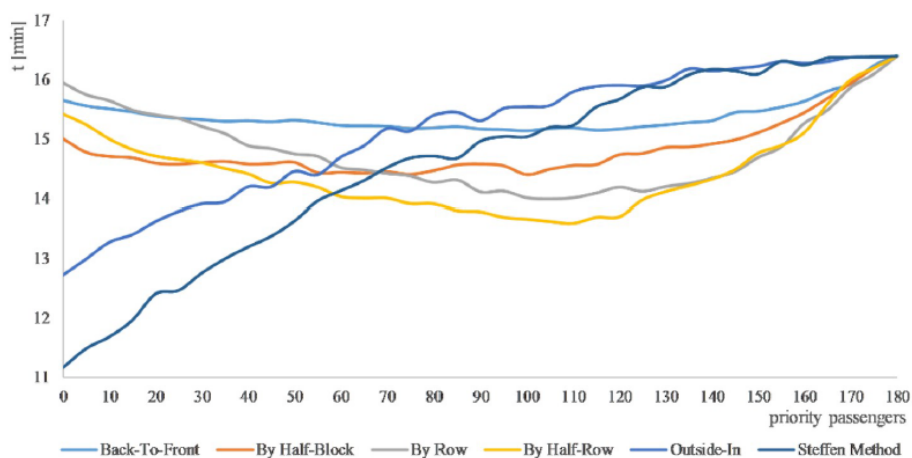


Figure 18: Følsomhedsanalyse af boardingstrategier (Kisiels, 2020)

Selvom Outside-in-strategien og Steffens metoden er mest sårbare over for prioriterede passagerer, betyder det ikke, at disse strategier er de dårligste. Den ovenstående figur viser, at jo bedre metoden fungerer i uforstyrret tilstand (resultat for 0 på X-aksen), jo mere sårbar er den. Selvom antallet af prioriterede passagerer stiger til 40, vil Outside-in strategien stadig give et bedre resultat end Back-to-Front, By half-Block, By Row og ved By half-Row. Steffens metoden giver det bedste resultat i op til 56 prioriterede passagerer. Outside-In og Steffen-metoden giver dårligere resultater end de andre metoder ved flere prioriterede passagerer. Dermed kan den bedste strategi vise sig at være den dårligste eller omvendt, hvis strategien bliver forstyrret af et bestemt antal prioriterede passagerer. Resultaterne for alle strategier er ens for 180 prioriterede passagerer. Dette skyldes, at 180 er den maksimale kapacitet, som flyet kan have, og dermed ville alle metoderne opføre sig som Random metoden.

7.3 Passagerer, som ikke overholder boarding regler

Boardingstrategierne, som er blevet gennemgået, tager heller ikke højde for, hvis passagerne ikke følger flyselskabets boardingregler. De foreslåede boardingstrategier er under forudsætning af, at alle passagerer overholder regler og procedurer, og strategierne ignorerer uregelmæssig menneskelig adfærd under boardingprocessen. Hvis passagerne ikke overholder reglerne, kan de ødelægge enhver effektiv boardingstrategi.

Zeineddines artikel "*Reducing the effect of passengers' non-compliance with aircraft boarding rules*" undersøger den manglende overholdelse af boardingregler, men foreslår også en metode for at afhjælpe den negative virkning, som den manglende overholdelse af regler kan have på den samlede boardingtid. Dette vil blive undersøgt i dette afsnit.

Når passagerer ikke overholder boardingreglerne, betyder det, i dette tilfælde, at passagerer ikke overholder deres plads i den rækkefølge, som en boardingstrategi foreslår. En passager uden for rækkefølgen betragtes som en tidlig boarder, hvis passageren kommer ind i flykabinen tidligere end forventet, og en sen boarder, hvis passageren kommer ind senere. Definitionen af en sen boarder gælder i dette tilfælde ikke for passagerer, som kommer ekstremt sent. En passager, som boarder tidligere eller senere end passagerens tur, bytter ikke position i rækkefølgen med en anden. Passageren forlader blot den originale position og bevæger sig til en anden selvbestemt position, og da tilfælde vil de to passagerer, som er før og efter den originale position blive tilstødende.

Passagerer, som ankommer for tidligt eller sent, påvirker strømmen i kabinen. I de fleste tilfælde skaber de yderligere forstyrrelser, som fører til en længere boardingtid. Rækkefølgen af passagerer betragtes i denne metode ikke kun som et arrangement af individueller passagerer men også passagerer, som boarder i grupper. Derfor betragtes en passager kun at være uden for rækkefølgen, når personen ikke går ombord med den tildelte passagergruppe.

Ved en tidlig boarder skal alle passagerer, mellem passagerens oprindelige position i rækkefølgen og den nye selvbestemte position, skifte en position bagud. Ved en sen boarder skifter passagerer

i det førstnævnte segment en position fremad. I begge tilfælde vil den overordnede boardingtid T ændres med Δ_T , hvilket kan beskrives ved ligning 12.

$$\delta_T = \sum_{i=n}^1 \delta_T(i) \quad (12)$$

hvor n er antallet af passagerer, som er ude for rækkefølgen, og $\delta_T(i)$ repræsenterer tidsforskellen, som skyldes den i -te passagerer, som er uden for rækkefølgen. Tidsforskellen kan beskrives ved ligning 13.

$$\delta_t(i) = T(S_i) - T(S_{i-s}) \quad (13)$$

hvor S_i repræsenterer den opdaterede tilstand af boardingrækkefølgen efter den i -te ude-af-rækkefølge-passager skifter position, hvilket er indikeret ved S_{i-1} . $T(S_i)$ er boardingtiden, som er opnået på baggrund af S_i . Ude-af-rækkefølge-passagerne er nummeret fra 1 til n fra første til sidste hændelse.

Målet, som artiklen foreslår, er at sikre, at ΔT er på sit minimum. Derfor må forstyrrelser forårsaget af passagerer uden for rækkefølgen minimeres for at sikre, at $\delta T(i)$ er lav for alle passagerer, der ikke overholder reglerne. Da en passager, der ikke overholder reglerne, selv bestemmer sin position tilfældigt i boardingrækkefølgen, må der indføres interventionstiltag for at minimere den tilsvarende $\delta T(i)$. For at opnå et mindst muligt $\delta T(i)$ skal den i -te passager, der ikke overholder reglerne, øjeblikkeligt opfanges og omplaceres i det resterende (ikke boardede) segment af boardinggen. Det er bedre at finde nye positioner i rækkefølgen til begge passagerer i en fælles handling snarere end to individuelle handlinger. Det er altså bedre at forsinke alle de passagerer, som ikke overholder rækkefølgen og lade dem boarde baseret på en bestemt orden, som minimerer Δ_T .

Tre grundlæggende implementeringer til boardingmetoder foreslås for at nå målet.

1. En tidlig boarder burde blive opfanget og tvunget til at vente ved gaten til, det er passagerens tur.
2. En sen boarder burde blive opfanget og tvunget til at vente ved gaten til alle passagerer, som følger den rigtige rækkefølge, har boardet.

3. Alle de sene boardere, som venter ved gaten, burde blive sorteret i en opnåelig rækkefølge, før de kan gå ind i kabinen. Her kan to alternative metoder undersøges:

- Sorter de forsinkede passagerer baseret på deres oprindelige orden på baggrund af den vedtagne boardingstrategi (INIT)
- Sorter de forsinkede passagerer baseret på deres sæder i en WMA og Back-to-Front måde (WABF). WABF er sat til at give grupper lov til at boarde sammen, hvis den originale boardingstrategi tillader det.

Simulering benyttes til at analysere virkningen af de foreslåede handlinger for at imødegå virkningen af passagerers manglende overholdelse på forskellige boardingstrategier.

Andelen af grupperejsende i modellen er 60% og størrelsen på grupper variere mellem 2 og 6 med følgende fordeling:

Str. på gruppe	2	3	4	5	6
Andel af grupperejsende	50	15	15	10	10

De valgte boardingstrategier er kategoriseret baseret på deres niveau af tilfældighed og en såkaldt ledsagervenlighed. Tilfældighedsniveauet er en kategorisk indikator, der beskriver niveauet af tilfældighed i en strategi. Ledsagervenlighed er en kategorisk indikator, der beskriver niveauet af overholdelse af passagerernes ret til at boarde i grupper. Niveauerne kan være enten fuld, delvis eller ingen. Strategierne og niveauerne af tilfældighed og ledsagervenlighed, er vist nedenstående tabel

Boardingstrategi	Tilfældighedsniveauet	Ledsagervenlighed
Random	Fuld	Fuld
Outside-in	Delvis	Delvis
By-Block	Delvis	Fuld
Steffen	Ingen	Ingen

Raten af passagerer, som ikke følger rækkefølgen i boardingmetoderne, er repræsenteret som et decimaltal mellem 0 og 1, som stiger med 0,1. Simuleringen som undersøger WABF og INIT har derudover følgende parametre

- Bagageprocent: {0, 20, 40, 60, 80, 100}
- Ledsagerprocent: {0, 20, 40, 60, 80}
- Interventionsmetode: {NONE, INIT, WABF}

Simuleringen starter med at initialisere parametre, som f.eks. boardingstrategi og interventionsmetode. Den tildeler derefter pladser til passagerne og sætter dem i rækkefølge baseret på den valgte boardingstrategi. Hele workflowet for simuleringen kan findes i bilag B.

Simuleringsresultaterne, som viser boardingtiden for hver af boardingstrategierne er baseret på rater af manglende overholdelse af regler og interventionsmetoder, er illustreret i figur 19.

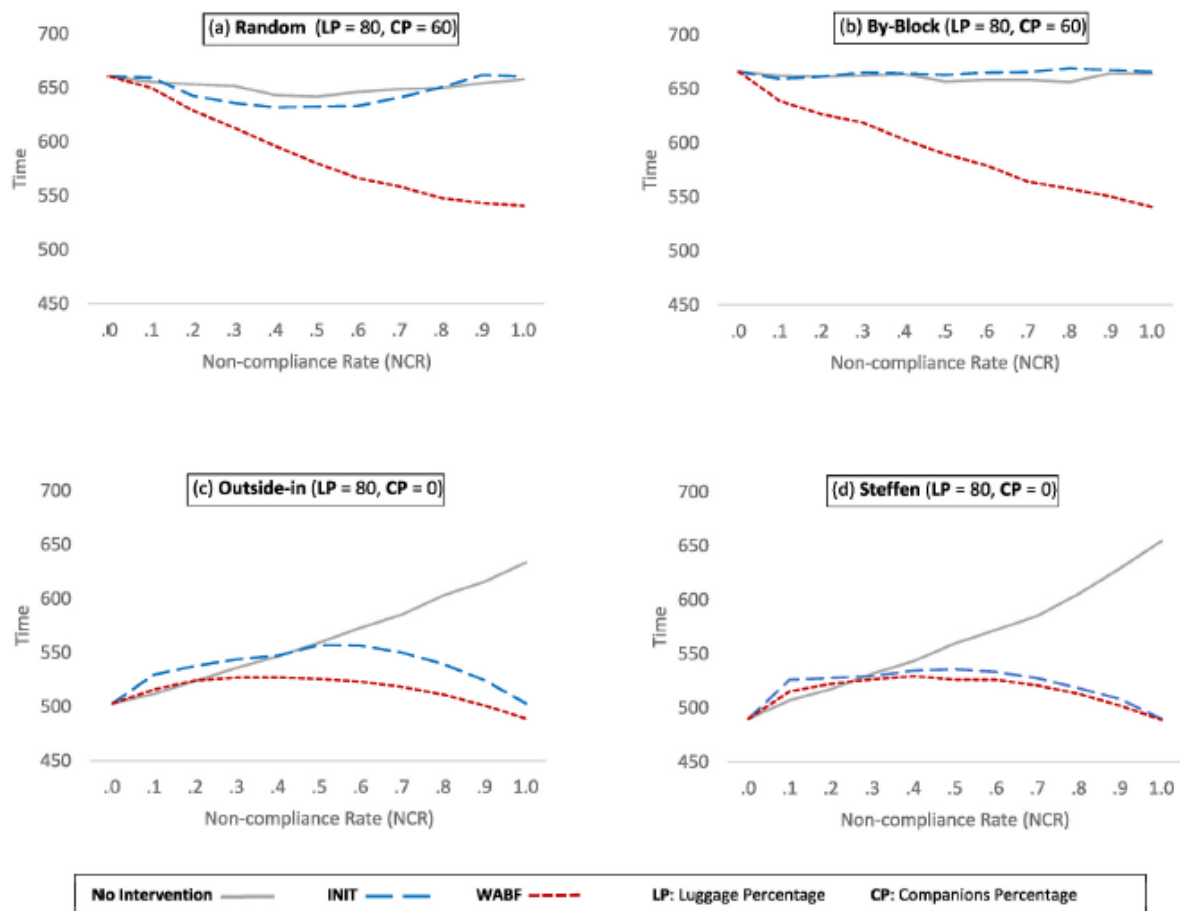


Figure 19: Præstation af boardingstrategier i forhold til passagerer, som ikke overholder reglerne (Zeineddines, 2021)

Graferne viser, at boardingmetoderne Random og By-Block ikke er signifikant følsomme for passagerers manglende overholdelse af boardingreglerne.

INIT og WABF fungerer ikke ved Random strategien, da der ikke er nogen underliggende passagerorden, der skal følges. WABF kan forbedre boardingens signifikant hvis passagerer er forsinket og grupperet sammen. Dette gælder selv for små procentdele af forsinkede grupperede passagerer.

Ved By-Block strategien er den underliggende orden at boarde i blokke. Når nogle passagerer ikke overholder reglerne, og dermed ikke boarder gennem blokke, da vil INIT ikke gøre nogen stor forskel på grund af By-Blocks tilfældighed i boardingprocessen. På den anden side er der en bemærkelsesværdig forbedring med WABF. Det kan tilskrives at WABF har en strengere orden end By-Block strategien.

Outside-in og Steffen strategierne er sensitive overfor passagerer, som ikke overholder reglerne. Boardingtiden blev gennemsnitligt 2,5% lavere for hver 10% forøgelse af passagerers manglende overholdelsesrate.

Manglen på tilfældighed og en streng orden forklarer Steffens meget sensitive resultater, når passagerer ankommer tilfældigt. I Steffens boardingstrategi nærmer både INIT og WABF en forbedring, når andelen af passagerer, som ikke overholder reglerne, nærmer sig 0,25.

Med hensyn til Outside-in er der en delvis tilfældighed i processen og passagerer har mulighed for at boarde i grupper. Til sammenligning med den anden delvist tilfældige strategi, By-Block, er Outside-in mere følsom over for passagerer som ikke overholder reglerne, da boardingblokkes form og størrelse spiller en rolle i den deraf følgende forstyrrelse forårsaget af passagerer, som ikke overholder reglerne. Passagerer, som ikke overholder reglerne når der boardes i søjleblokke, vil helt sikkert opleve sædeforstyrrelser og kan skabe gangforstyrrelser for andre, når de går ombord uden for det angivne tidspunkt for deres blokke. Når der boardes ved rektangulære blokke, opstår der muligvis ikke forstyrrelser, når de går ombord på flyet, men det er afhængigt af deres sædepositioner inden for blokken.

Ved anvendelse af interventionsmetoden INIT i Outside-in begynder strategien at forbedre sig gradvist efter en manglende overholdelse på 0,5. Med WABF-tilgangen starter forbedringen

meget tidligere, nemlig efter en manglende overholdelse på 0,2. Sortering af passagerer for at fortsætte i henhold til WABF vil medføre mindre forstyrrelser og et mere jævnt flow end Outside-in. Derfor er det ikke overraskende at se, at interventionstilgangen WABF overgår INIT.

Overordnet er resultatet for denne analyse, at når niveauet af tilfældighed er højt i en boardingstrategi, såsom Random og By-Block metoderne, da er passagerers manglende overholdelse af regler ikke et stort problem. INIT-metoden har i disse tilfælde ingen betydning. På den anden side kan WABF-metoden give en væsentlig forbedring, simpelthen fordi det er en meget ordnet tilgang, der supplerer en meget uordnet boardingstrategi. Når niveauet af tilfældighed i en strategi er moderat til lav, giver begge tilgange, INIT og WABF, bemærkelsesværdige forbedringer, f.eks. med Steffen og Outside-in, som har lave tilfældighedsniveauer. WABF overgik også INIT i begge tilfælde. Der kan dermed ikke siges noget generelt om de to interventionstilgange, da det er tydeligt, at resultaterne afhænger af boardingstrategien, som anvendes.

Det er dermed vist, at forringelser i boardingtiden forårsaget af passagerers manglende overholdelse af boardingregler kan være reduceres betydeligt ved at opfange passagerer, der ikke overholder kravene og gruppere dem, og sende dem ombord på flyet som de sidste i henhold til INIT- eller WABF-tilgangen. Denne opnåede reduktion er modstandsdygtig over for stigningen i bagagebelastning eller ledsagerprocent. Den største reduktion bemærkes med højt ordnede ikke-tilfældige strategier.

8 Boardning og Covid-19

Efter hele verdenen blev ramt af coronavirus har flytrafikken ændret sig markant. Pludselig blev landegrænser lukket, og flytrafikken blev dermed hårdt ramt.²⁴ Flyselskaberne skal som følge af corona finde på nye løsninger for at reducere risikoen for spredning af vira, når passagerer boarder deres fly, og samtidig med stadig at have den hurtigste mulige boardingtid.

Ved flyrejser er boardingen den mest risikofyldte del af rejseprocessen i forhold til corona, da passagerer uvægerligt kommer til at stå tæt. I terminalerne er der nemlig plads til at folk kan sprede sig ud, og i flykabinen bliver kabineluften udskiftet omkring hvert femte minut og filtreres med filtre af hospitalskvalitet, som fjerner mere end 99% vira og bakterier. Ved boardingprocessen kan det være svært at holde social afstand til andre passagerer, og boardingen foregår i dårligt ventilerede rum, når boardingen (og deboarding) foregår via jetbroer eller transferbusser.²⁵ Disse operationer kan være potentielle steder, hvor vira kan spredes mellem passagerer, og kræver passende pladsfordeling og strategier for at reducere transmissionsrisikoen.

Det kan antages, at lufttrafik i fremtiden vil blive mødt med krav, som også skal tage højde for pandemirelaterede regler, som er ud over de sundheds- og sikkerhedsforanstaltninger, som er en del af nutidens lufttrafik. Dermed er det relevant at undersøge de nyudviklede boardingmetoder, som tager disse hensyn.²⁶

Mange tiltag for at begrænse virusspredningen er blevet taget, for at der overhovedet kan være en flytrafik. Passagerer og besætning bliver beskyttet mod corona ved bl.a. ansigtsværnemidler, rengøring og desinfektion og coronatests.²⁷ Dog har bivirkningen fra et operationelt synspunkt fordoblet boardingtiden sammenlignet med situationen før corona.²⁸

Der er allerede blevet undersøgt og foreslået flere boardingstrategier, som kan medføre hurtige boardingtider med højere sundhedssikkerhed, som bl.a. kan beskytte passagerer mod coronavirus. Disse strategier er bl.a. at åbne for både bag- og fordøren og dermed adskille passagerstrømmen i to. Det er ikke muligt ved en jetbro, så det ville kræve, at passagerer kan boarde flyet udenfor

²⁴CPH

²⁵Frost, 2020

²⁶Schultz & Soolaki, 2021

²⁷Schultz & Soolaki, 2021

²⁸Frost, 2020

på landingsbanen.²⁹

Steffens metode kan også overvejes, fordi den flytter passagerer meget hurtigt igennem boardingprocessen. Derudover, når passagerer stopper op, så stopper de ikke op ved siden af andre.

Som tidligere nævnt er håndbagage en stor tidsbelastning for boardingprocessen og skaber mange forstyrrelser, hvor passagerer kan komme i for tæt kontakt med hinanden, hvorfor det kan være en fordel at opfordre passagerer til at reducere mængden af håndbagage. I Indien overvejes det angiveligt helt at forbyde håndbagage ved flyrejser.³⁰

Milne, Delcea & Cotfas har i deres artikel *Airplane boarding methods that reduce risk from Covid-19* også undersøgt metoder, som nedenfor vil blive undersøgt mere dybdegående.

8.1 Boardingmetode som begrænser coronasmitte

Et af de mest diskuterende tiltag for at reducere risikoen for corona under flyrejser vedrører social afstand. Det er dermed vigtigt ved en corona-boardingmetode, at lave foranstaltninger, som reducerer interaktioner mellem passagerer. Minimumsafstanden mellem passagerer varierer mellem 1 og 2 meter ifølge The International Air Transport Association (IATA).

I alt vil 8 boardingmetoder blive testet og vurderet under forskellige scenarier i forhold til følgende 4 målinger:

- Boardingtid
- Antal sædeforstyrrelser
- Risiko ved af gangsæde
- Risiko ved af vinduesæde

De sidste 3 målinger er sundhedsrisikomålinger, som kan hjælpe med at beskrive sikkerheden ved boardingmetoderne.

²⁹Schultz & Soolaki (2021)

³⁰Frost, 2020

Til modellering og analyse af metoderne antages et enkelt dørs fly, som har en gang, 30 rækker og tre sæder på hver side af midtergangen. Alle midtersæderne "fjernes", så de ikke kan besættes, og dermed kan afstandskravene overholdes, når passagerne sidder ned.

De fire målinger, som blev nævnt i de ovenstående punkter, har forskelligt omfang, og måles dermed på forskellige måder. Sædeforstyrrelser måles som det samlede antal af forstyrrelser. De sidste to punkter er sundhedsrisikomålinger, som berører muligheden for, at Covid-19 dråber spredes fra inficerede passagerer, som bevæger sig ned ad kabinegangen (eller står i kabinegangen) til deres tildelte pladser. Gangsæderisiko vurderes ved forekomst af den risiko for passagerer, der allerede sidder i gangsæder, mens vinduespladsrisikoen vurderes ved forekomsten af risikoen for passagerer, der allerede sidder i vinduespladserne.

To af metoderne, som undersøges, er baseline metoder, som er Modified Reverse Pyramid og Back-to-Front by Row. Modified Reverse Pyramid metoden er en modificeret version af Reverse Pyramid boardingmetoden, hvor der tages hensyn til social afstand. Disse metoder er valgt, som baseline metoder, da det ved tidligere undersøgelser i forbindelse med boarding under corona, er blevet påvist at have lav sundhedsrisiko, og hurtige boardingtider.

Resten af metoderne, som bliver undersøgt, er nye og baseret på Back-to-Front og WilMA. Den første af de nye boardingmetoder kaldes for Back-to-Front by Row - WilMA. Metoden navigerer passagerne en række ad gangen og starter bagfra. For hver række starter de to passagerer med vinduespladser med at boarde flyet i en tilfældig rækkefølge, efterfuldt af passagerne med gangpladserne, som også er i en tilfældig rækkefølge. Boardingstrategien er vist i figur 20.

Række	Forrest			
1	19	20	20	19
2	17	18	18	17
3	15	16	16	15
4	13	14	14	13
5	11	12	12	11
6	9	10	10	9
7	7	8	8	7
8	5	6	6	5
9	3	4	4	3
10	1	2	2	1

Figure 20: Back-to-Front by row - WilMA boarding

De resterende 5 nye boardingmetoder dannes ved at justere Back-to-Front by Row - WilMA-metoden, så flere vinduesædepassagerer kan boarde før gangsædepassagerne. Ved en *offset* parameter, k , tillader metoder, at k rækker af vinduesædepassagerer kan boarde før. Den nye metode kaldes Back-to-Front by row - WilMA - offset k , og k ligger mellem 2 og 6. Hvis $k = 2$ kan de 4 passagerer med vinduesædepladser i række 30 og 29 boarde flyet først, efterfulgt af de passagerer, som har gangsædepladser i række 30 og vinduesædepladser i række 28. Sådan fortsætter boardingrækkefølgen indtil alle sæder er optaget. Jo højere k er, jo større bliver andelen af passagerer med vinduesæde, som boarder før gangsædepassagerer. Back-to-Front by Row - WilMA offset 2 er vist i figur 21.

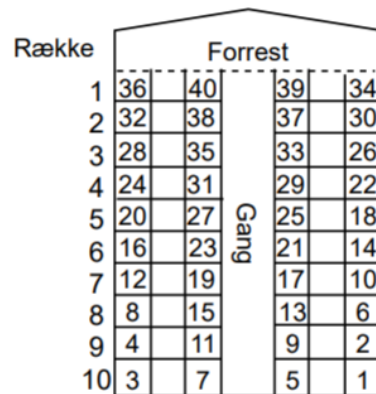


Figure 21: Back-to-Front by Row - WilMA offset 2 boarding

Syv bagagescenarier bliver testet for de forskellige boardingmetoder og er præsenteret i nedenstående tabel.

Scenarie:	Antal håndbagage:				
	0	1 lille	2 små	1 stor	1 stor og 1 lille
S1	10%	10%	0%	10%	70%
S2	15%	20%	5%	10%	50%
S3	25%	20%	10%	15%	30%
S4	35%	25%	10%	15%	15%
S5	60%	10%	10%	10%	10%
S6	80%	5%	5%	5%	5%
S7	100%	0%	0%	0%	0%

De forskellige boardingmetoder og scenarier er analyseret og simuleret i en agentbaseret model i NetLogo. Alle scenarier er simuleret 10.000 gange. Ud fra simuleringerne præsenteres numeriske resultater ud fra de tidligere beskrevne målinger for at evaluere ydeevnen for alle 8 boardingmetoder for hver af de syv bagagescenarier. Resultater bliver præsenteret for både 1 meters og 2 meters social afstand.

Alle resultaterne som Milne, Delcea & Cotfas fandt ved deres undersøgelse for de 4 forskellige målinger, for 1 meters afstand og 2 meters afstand findes i bilag C.

Den gennemsnitlige boardingtid for hver af de 8 boardingmetoder og 7 bagagescenarier med en meters afstand er illustreret i figur 22, og viser, ikke overraskende, at boardingmetoderne med ingen håndbagage (S7) giver de hurtigste boardingtider, uanset hvilken boardingmetode som testes. Ved S7 er det Back-to-Front by Row - WilMA-offset-metoderne, som alle 5 klarer sig bedst, men Back-to-Front by Row - WilMA-metoden klarer sig stort set lige så godt. Disse metoder er derimod ikke lige så gode, når passagerer medbringer håndbagage. Ved alle andre bagagescenarier har baseline metoden Modified Reverse Pyramid den hurtigste boardingtid på nær S4, hvor Back-to-Front by Row - WilMA-offset-4-metoden er den hurtigste. Offsetmetoderne har boardingtider, der er næsten lige så gode som dem, Modified Reverse Pyramid opnår, med undtagelse af S1, som har det højeste antal af bagage.

Boarding method	Aisle distancing: 1 m						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Baseline 1: Back-to-front by row	1,432	1,309	1,201	1,101	1,013	916	779
Baseline 2: Modified reverse pyramid half zone	903	867	829	795	742	669	518
Back-to-front by row – WilMA	1,151	1,035	935	850	785	700	498
Back-to-front by row – WilMA – offset 2	914	872	830	792	750	680	497
Back-to-front by row – WilMA – offset 3	918	876	832	793	748	676	497
Back-to-front by row – WilMA – offset 4	925	878	833	791	745	676	497
Back-to-front by row – WilMA – offset 5	930	884	836	793	745	676	497
Back-to-front by row – WilMA – offset 6	944	887	839	795	747	671	497

Figure 22: Gennemsnitlige boardingtider for de 8 boardingmetoder (Milne, Delcea & Cotfas, 2021)

Baseline metoden Back-to-Front by Row forventes at have sædeforstyrrelser, da passagerne boarder i en tilfældig rækkefølge i hver række. Gennemsnitligt har metoden også 30 sædeforstyrrelser, hvilket var forventelig. De syv resterende boardingmetoder oplever ingen sædeforstyrrelser.

Den gennemsnitlige gangsæde risiko forbedres jo færre tasker passagerer har med ombord på flyet, for så bruger passagerne ikke lige så meget tid i kabinegangen. De seks nye metoder er bedst, og deres resultater er omtrent de samme for alle bagagescenarier. Begge baseline metoder præsterer meget dårligere.

Den sidste sundhedsrisiko er risikoen ved at have vinduesplads. Ved denne sundhedsrisiko er det to metoder, som har de bedste resultater. Back-to-Front by Row-metoden har lavest risici, når passagerer har et højt antal håndbagage med (S1, S2 og S3) og klarer sig næstbedst i de resterende scenarier. Back-to-Front-WilMA-metoden præsterer bedst, når passagerer ikke har nær så meget håndbagage med ombord på flyet (S4, S5, S6 og S7) og næstbedst i de resterende scenarier. Ved offset-metoderne stiger risikoen i takt med, at k øges, og dermed klarer metoderne sig bedst ved $k = 2$. Dette giver også mening, da antallet af passagerer med vinduesædepladser, som boarder først, stiger når k stiger. Modified metoden er metoden med absolut højst sundhedsrisiko for passagerer med vinduesplads.

Ud fra de fire målinger kan det konkluderes, at Back-to-Front by Row - WilMA - offset 2, Back-to-Front by Row - WilMA og Modified Reverse Pyramid er de metoder, som giver de bedste resultater, når der skal være 1 meters afstand imellem passagerne. Disse tre metoders resultater er summeret i figur 23 for scenariet med størst (S1), mellem (S4) og mindst (S7) mængde håndbagage. De tre boardingmetoder er optimale for forskellige bagagescenarier og i forskellige målinger. Det ses bl.a. fra figur 23, at Back-to-Front by Row - WilMA-metoden har den længste boardingtid ved en høj mængde af håndbagage. Modified Reverse Pyramid-metoden har de hurtigste boardingtider uanset, hvilket bagagescenarie som undersøges, men sundhedsrisikoerne er også en del højere end de resterende metoder. Back-to-Front - WilMA offset 2-metoden har, ligesom Modified Reverse Pyramid-metoden, hurtige boardingtider, men metoden præsterer bedre i forhold til sundhedsrisikoerne, hvorfor metoden kan konkluderes at være den mest optimale.

Metric	Luggage scenario	Boarding Method		
		Baseline 2: Modified reverse pyramid half zone	Back-to-front by row – WilMA – offset 2	Back-to- front by row – WilMA
Boarding time	S1	903	914	1,151
	S4	795	792	850
	S7	518	497	498
Aisle seat risk	S1	1,741	189	188
	S4	1,440	84	83
	S7	1,034	36	36
Window seat risk	S1	7,232	1,352	871
	S4	6,055	835	398
	S7	4,268	528	180

Figure 23: De 3 bedste metoder med 1 meters afstand (Milne, Delcea & Cotfas, 2021)

Samme undersøgelser er blevet lavet, når passagerne skal overholde et 2 meters afstandskrav. Når afstandskravet ændres fra 1 meter til 2 meter, så ændres resultaterne naturligvis også.

Boardingtiderne bliver, uanset hvilken metode og hvilket bagagescenarie, selvfølgelig længere end den var ved 1 meters afstand. Ligesom ved 1 meter er det baseline metoden Back-to-Front by Row, som har de længste boardingtider uanset bagagescenariet. Den anden baseline metode Modified Reverse Pyramid giver, ligesom ved 1 meters tilfældet, hurtige boardingtider og specielt i de tilfælde, hvor mængden af håndbagage er lille, har den de hurtigste boardingtider (S4, S5 og S6). Offsetmetoderne med $k = 3$ til 6 giver stort set de samme resultater uanset bagagescenariet og giver også de hurtigste boardingtider, når passagerer medbringer en større mængde af bagage (S1, S2 og S3), og når der ingen bagage er (S7). Back-to-Front by Row - WilMA og offsetmetoden med $k = 2$ har næsten lige så hurtige boardingtider som de resterende offsetmetoder og er lige så hurtige, når passagerer ingen bagage medbringer.

Resultaterne for sundhedsrisikomålingerne er næsten de samme som for 1 meters afstand. Hvilket også giver mening, idet det samme antal passagerer stadig skal passere hinanden. Antallet af sædeforstyrrelser er det samme som ved 1 meters afstand. Det er derudover de 6 nye metoder, som har lavest risiko for de passagerer, som har gangsædepladser og de to baseline metoder, som har højst risiko (især Modified Reverse Pyramid). Risikoen ved vinduespladsen med 2 meters afstand er, ligesom ved 1 meters afstand, lavest for baseline metoden Back-to-Front by Row, når

passagerer medbringer meget bagage (S1, S2 og S3), og den klarer sig næstbedst ved en lille mængde bagage. Omvendt klarer Back-to-Front by Row - WilMA sig bedst ved lavere mængde bagage (S4, S5, S6 og S7) og næstbedst ved højere mængde bagage. Modified Reverse Pyramid har højest risiko ved alle bagagescenarier.

Figur 24 illustrerer de fire bedste kandidater, når passagerer skal holde 2 meters afstand til hinanden. Disse kandidater er blevet udvalgt ved samme kriterier som for tilfældet med 1 meters afstand. Den eneste forskel er blot, at Back-to-Front by Row - WilMA - offset 3-metoden er blevet udvalgt som en af de bedste, idet den er mere optimal, når der er 2 meters afstand. Metoden har gode boardingtider, og er endda den hurtigste ved S1 og har derudover en lav gangsæderisiko. Back-to-Front by Row - WilMA-metoden har lavest vinduesæderisiko uanset scenariet og også lave boardingtider og kan dermed siges at præstere bedst sammen med Back-to-Front by Row - WilMA - offset 3-metoden.

Metric	Luggage scenario	Boarding Method			
		Baseline 2: Modified reverse pyramid half zone	Back-to-front by row – WilMA – offset 2	Back-to-front by row – WilMA – offset 3	Back-to-front by row – WilMA
Boarding time	S1	1,416	1,610	1,406	1,608
	S4	1,260	1,312	1,262	1,314
	S7	853	836	836	836
Aisle seat risk	S1	1,679	186	187	189
	S4	1,400	84	84	83
	S7	1,045	36	36	36
Window seat risk	S1	6,959	1,327	1,687	871
	S4	5,906	825	1,159	400
	S7	4,283	528	799	180

Figure 24: De 4 bedste metoder med 2 meters afstand (Milne, Delcea & Cotfas, 2021)

Ud fra Milne, Delcea og Cotfas studie ses det altså, at det ikke nødvendigvis er de hurtige boardingmetoder, som flyselskaberne allerede bruger i dag, der er de bedste, når det kommer til sundhedsrisiko. Andre metoder, som dem der bliver præsenteret i studiet, kan altså have hurtige boardingtider og samtidig tage højde for at mindske smittespredning under boarding af fly.

9 Simulering af boardingmetoder

En simuleringsmodel er blevet programmeret for at teste boardingmetoderne, som afhandlingen har undersøgt. Helt konkret analyserer simuleringsmodellen forskellen på boardingtiderne for forskellige boardingmetoder.

Computersimuleringer er brugbare til at udvikle og teste boardingstrategier. Simuleringer tillader nemlig test af en boardingstrategi uden omkostninger, derudover er de brugbare og lette at lave gentagne forsøg med. Det interessante ved at simulere de forskellige boardingmetoder er ikke at estimere den faktiske tid det tager at boarde et fly, men nærmere at undersøge den relative tidsforskel mellem de forskellige metoder.

9.1 En agentbaseret simuleringsmetode

Når simuleringsmodeller skal bygges kan de både være ABM (Agent-based modelling) eller EBM (equation-based modelling). I ABM kan agenterne i modellen have flere forskellige træk, f.eks. om passagerer går langsomt eller hurtigt. ABM har derudover også diskrete interaktioner og EBM har kontinuerte interaktioner.³¹

I denne afhandling benyttes en ABM, for at afspejle reelle situationer af passagerstrømme i fly. En ABM kan generere autonome agenter i et modelleringsmiljø. En ABM giver mulighed for at modellere sociale systemer som er sammensat af agenter, som interagerer med og påvirker hinanden, og lære fra oplevelser.

En typisk ABM har tre hovedelementer, som skal identificeres og modelleres

1. Et sæt af agenter, deres egenskaber og opførsel
2. Agentrelationer og agentmetoder (samspillet mellem agenter)
3. Agenternes miljø. Agenterne interagerer også med deres miljø udover med hinanden.

Den vigtigste definerende egenskab for en agent er evnen til at handle autonomt. Det betyder at handle selv uden ekstern vejledning som reaktion på situationer, som agenten møder. Agenter

³¹Delcea, Cotfas & Paun, 2018

er typisk aktive ved at tage initiativ til deres handlinger for at opnå deres egne mål, i stedet for at være passive og kun reagere overfor andre agenter og deres miljø. Der er ingen præcis og universal definition på en agent, men fra et praktisk modellerings udgangspunkt er følgende egenskaber essentielle.

- En agent er en selvstændig, entydig identificerbar person, som har begrænsninger
- En agent er autonom og selvstyret
- En agent har en tilstand, som varierer over tid
- En agent er social og har dynamiske interaktioner med andre agenter, som påvirker dens opførsel. Agenter har protokoller for interaktioner med andre agenter som f.eks. kommunikation, bevægelse, evnen til at reagerer på miljøet osv.

I en ABM er alt som tilknytter sig til en agent enten en agentegenskab eller en agentmetode. Egenskaber kan være statiske og ikke ændre sig gennem simuleringen eller dynamiske og ændre sig i takt med at simuleringen skrider frem. Metoden opererer på agenten, såsom regler for opførsel.

En vigtig egenskab for agents relationer og samspil er, at det kun er lokal information, som er tilgængeligt for agenterne. Der er ingen central myndighed, der enten skubber globalt tilgængelig information ud til alle agenter eller styrer deres adfærd i et forsøg på at optimere systemets ydeevne. Agenter interagerer med andre agenter, men ikke alle agenter interagerer direkte med hinanden hele tiden. En agent interagerer typisk med en delmængde af andre agenter, kaldet agents naboer. En agents naboer kan ændres hurtigt, efterhånden som simuleringen fortsætter, og agenterne bevæger sig rundt.³²

Passageragenter er programmeret til at kommunikere med hinanden og have interaktioner med lufthavnens og flyets faciliteter, hvilket også er meget lig passageroplevelsen i den virkelige verden.³³

³²Macal & North, 2010

³³Delcea, Cotfas & Paun, 2018

9.2 Simuleringsmodellen

Modellerings softwareprogrammet NetLogo er blevet valgt til at programmere boardingscenerier for denne afhandling. Programmet giver mulighed for realtidvisualisering af agenternes handlinger, og det er let at tilgå med en grundlæggende programmeringsviden. NetLogo er derudover et relevant værktøj når en ABM skal programmeres.

Der findes to typer af agenter i NetLogo. Den første kaldes for *turtles*, som kan bevæge sig rundt i simuleringsverdenen, og som i denne afhandling repræsenterer passagerne. Turtles kan interagere med hinanden og med den anden type af agent. Verdenen i Netlogo er todimensionel og opdelt i et gitter af såkaldte *patches*, som er den anden type af agent. I afhandlingen repræsenterer patches selve flykabinen. Det betyder altså, at passagerne interagerer med hinanden og med flykabinen, som er miljøet.³⁴

Simuleringsmodellen er blevet bygget på baggrund af viden fra Netlogos egen hjemmeside, hvor en programmeringsguide har givet meget god viden³⁵ og med inspiration fra simuleringer, som andre programmører har lavet i NetLogo.³⁶ De forskellige funktioner og egenskaber i simuleringsmodellen vil nu blive uddybet.

9.2.1 Passageregenskaber

Simuleringsmodellens agenter, passagerer, kan medbringe håndbagage ombord på flyet, og passagerne differentieres på, hvor meget håndbagage de medbringer til flyet. Passagerne i denne simulering kan kun boarde et fly individuelt og ikke i grupper. Der tages dermed ikke hensyn til f.eks. familier, der rejser sammen. Passagerer har i denne simuleringsmodel flere egenskaber, som beskriver deres bevægelse og deres medbragte håndbagage. Disse egenskaber er beskrevet i nedenstående tabel.

³⁴NetLogo

³⁵NetLogo

³⁶Inspirationkilde 1, Inspirationkilde 2, Inspirationkilde 3

Egenskab	Beskrivelse
gotoX, gotoY	Passagerbevægelse
Bagagemængde	Hvor meget håndbagage hver passagerer har medbragt. De kan medbringe 1 eller 2 stykker
Bagage-status	Om en passager har medbragt håndbagage
Loadetid	Hvor længe en passager er om at loade sin håndbagage til håndbagage hylden.
Vent-sæde-optaget	Hvis der forekommer sædeforstyrrelser

Passagerne i modellen kan have 3 forskellige farver, alt efter deres bagagestatus og bagagemængde. Hvis en passager ikke medbringer håndbagage er personen violfarvet, hvis passageren medbringer en taske er personen gul og hvis personen medbringer 2 tasker er personen orange. Når en passager har fundet og sat sig på sin korrekte plads bliver passageren rød.

9.2.2 Passageradfærd

Simuleringen betragter passagerer, som bevæger sig ned ad kabinegangen af et fly og hen mod sit sæde. Det antages, at hver passager fylder længden af en række, dvs. at der kan være så mange passagerer i kabinegangen, som der er sæderækker. For at en passager kan komme til sit sæde, skal passageren gå ned ad kabinegangen til pladsen direkte ved siden af sin række og derefter sætte sig ned. Passagerne kan ikke gå forbi hinanden i kabinegangen, så de kan kun bevæge sig fremad, hvis der ikke står en anden person foran dem. Det betyder, at hvis en passager stopper for f.eks. at lægge sin bagage på bagagehylden, så må køen af passagerer bag personen vente til, at han/hun er færdig med at loade sin taske og har sat sig ned, før de andre passagerer kan komme videre. Passagerer, som har medbragt håndbagage, skal også loade deres håndbagage inden de tager plads. En passagers adfærd vedrørende sin håndbagage er illustreres i figur 25.

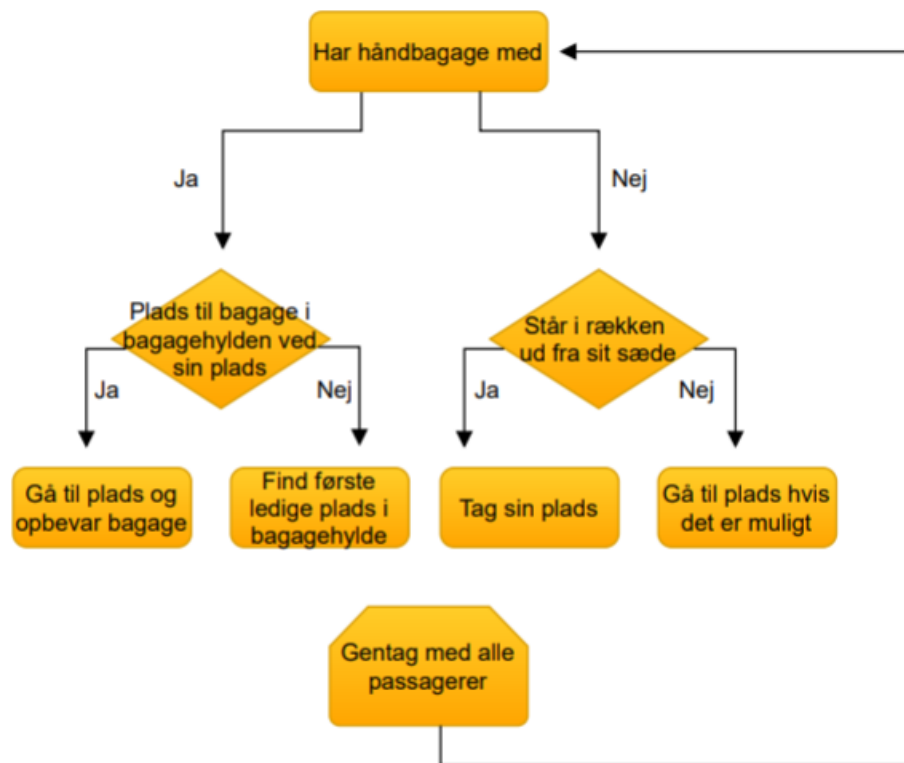


Figure 25: Passageradfærd

9.2.3 Simuleringsmiljøet - flykabinen

Simuleringen er lavet for et lille fly. Flyet har plads til 120 passagerer fordelt på 20 rækker med plads til 6 passagerer per række, som er opdelt med en kabinegang i midten. Ligesom ved rigtige fly er pladserne delt op fra A-F i de forskellige rækker. Passagerer kan kun boarde ved en indgang, som er placeret i den forreste ende af flyet. Det svarer til at boarde et fly direkte fra gaten via en jetbro.

Håndbagagen vises ikke i flymodellen i interfacet, udover at bagagestatusen kan identificeres ud fra farverne på passagerne. Koden er programmeret så det svarer til at håndbagagen kan placeres i bagagehylderne "over" passagerers sæder. Alle passagerer kan placerer deres håndbagage ud fra deres tildelte sæderække, da der er uendelig meget plads til håndbagage i simuleringen. Håndbagage er fordelt tilfældigt ud til passagerne.

9.2.4 Simuleringsmodellens interface

Simuleringsmodellen er blevet programmeret for at undersøge og simulere lige præcis de metoder, som denne afhandling undersøger. Simuleringsmodellens interface er vist i figur 26. Interfacet viser flytypen, som er beskrevet ovenfor.

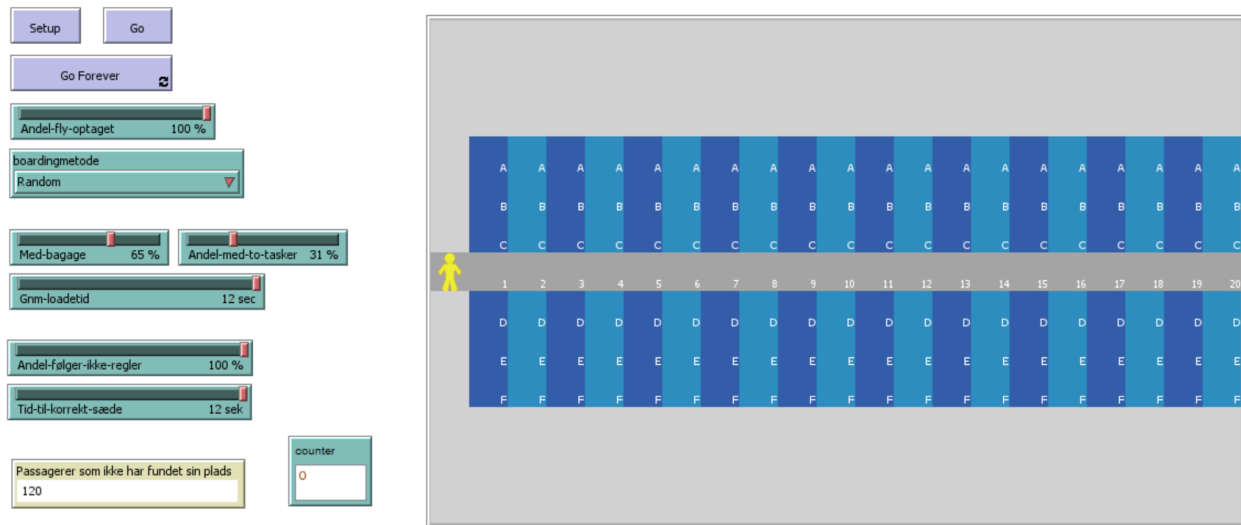


Figure 26: Simuleringsmodel interface

Interfacet indeholder flere knapper og funktioner, som kan bruges til at kontrollere og styre simuleringen. De forskellige knapper og funktioner er beskrevet i tabellen herunder

Knap/funktion	Beskrivelse
Setup	Danner og nulstiller flyet og passagerne.
Go	Starte simulering - ved et klik køres et trin i simuleringen
Go forevigt	Starte simulering - slutter først når en simulering er kørt færdig
Andel-fly-optaget	Hvor stor en andel af flyet fyldes op - står som udgangspunkt på 100%, hvis ikke andet nævnes
Boardingmetode	Hvilken boardingmetode simuleringsmodellen skal køre, hvor der kan vælges mellem Random, WMA, Reverse Pyramid, Back-to-Front og Steffen
Med-bagage	Andel af passagerer som medbringer håndbagage
Andel-med-to-tasker	Andel af passagerer som medbringer 2 tasker
Gnm-loadetid	Den gennemsnitlige loadetid (i sekunder)
Andel-følger-ikke-regler	Andel af passagerer som ikke følger reglerne
Tid-til-korrekt-sæde	Tiden det tager (i sekunder) hvis passagerer ikke følger rækkefølgen og dermed skal finde deres korrekte sæde
Passagerer, som ikke har fundet deres plads	En tællefunktion som tæller ned fra 120 (antal passagerer på flyet) til 0 (når alle passagerer har fundet deres plads)
counter	Tæller antal ticks og forsinkelser som kan opstå i boardinggen ved at loade bagage. En forsinkelse er et lig med et tick. Dermed vil tiden som passagerne bruger på at boarde et fly, altid stige jo flere passagerer som har håndbagage med, hvilke også vil ske i den virkelige verden

9.2.5 Simuleringen/simuleringskørsel

Ticks er en indbygget tællefunktion i NetLogo. Denne tællefunktioner tæller 30 ticks per sekund ved dens standard hastighed, som er den hastighed, der benyttes til denne simulering. Denne tæller kan dermed bruges til at sammenligne de forskellige modeller. Simuleringstiden kan dog ikke oversættes til virkelig tid, og dermed kan boardingtiden for de forskellige metoder ikke oversættes direkte til den virkelige verden.

Når en simulering sættes i gang bevæger passagerer sig ned ad gangen en efter en og hen til deres tildelte række og loader deres håndbagage, hvis de har noget, og sætter sig på deres tildelte plads. For hvert tick bevæger passagerne, som er kommet ombord på flyet sig et trin. Dvs. enten rykker de et skridt frem ad kabinegangen, lægger håndbagage på plads eller rykker sig ind ad rækken til passageren når sin plads. Dette gør alle passagerne ombord på flyet simultant. For at kunne holde et overblik under en simuleringskørsel, så bliver passagerne røde, når de når deres endelig plads. Boardingtiden starter i denne simuleringsmodel når den første passager bevæger sig ind i flykabinen og stopper, når den sidste passager har sat sig på sin plads.

For at illustrere, hvordan simuleringen ser ud, når den kører, er en lille billedeserien blevet konstrueret og er vist i figur 27.

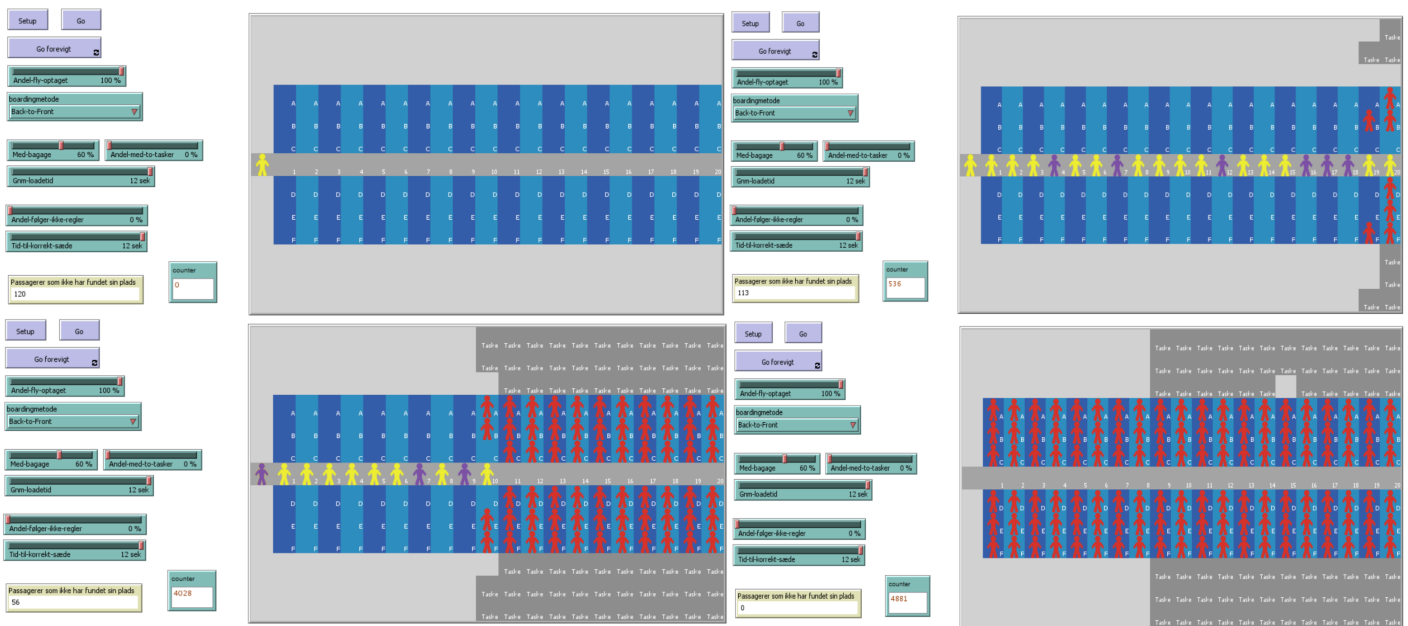


Figure 27: Billedeserie for simuleringskørsel

Som det kan ses fra figur 27 vises billedeserien for Back-to-Front metoden, hvor 60% af passagerne har en taske med. Derudover overholder alle passagerne rækkefølgen som boardingmetoden har givet. Serien starter i øverste venstre hjørne hvor en passager med en taske står klar til at finde sin plads. I næste billede i serien (øverste til højre), har de første passagerer fundet deres korrekte plads, og loadet deres tasker, og de er dermed blevet røde. Andre passagerer, med og uden bagage, er på vej ned af kabinegangen. Ved tredje billede (nederst til venstre) har lige over halvdelen af passagerne boardet flyet og ved det sidste billede (nederst til højre) er flyet helt boardet med en tid på 4881 ticks, hvilket svarer til knap 3 minutter.

Som det er nævnt i tabellen i afsnit 9.2.4 (Simuleringsmodellens interface) er det ikke alle de boardingmetoder, som er blevet gennemgået i denne afhandling, som kan testes i boardingmetoden. For det første er det for omfattende, hvis alle de klassiske boardingmetoder skulle testes, da flere af dem minder meget om hinanden. Der er derfor blevet udvalgt nogle med forskellige boardingsekvenser.

For det andet er simuleringsmodellen begrænset, hvilket betyder at flere af de avancerede

modeller ikke kan testes. Boardingtiden i simuleringsmodellen starter først, når passagerne går ombord på flyet, og passagerne kan kun boarde flyet igennem én dør, hvorfor det ikke giver mening at inkludere tranferbus-metoden. Derudover tages der heller ikke hensyn til, hvis passagerer boarder i grupper, og passagerer kan ikke have prioriteringsæder. Da boarding under Covid-19 har begrænsninger, som gør at ingen midtersæder kan optages af passagerer, giver det ikke mening at sammenligne disse boardingmetoder med boarding under normale forhold, som er når alle sæder kan blive optaget.

Selvom, som der er tidligere er nævnt, er mange flyselskaber, der i dag har regler som kun tillader, at hver passager må medbringe et styk håndbagage på deres rejse, så tager simuleringsmodellen hensyn til, at der er mulighed for at medbringe 2 stykker håndbagage. Det er relevant for at undersøge, hvordan yderligere håndbagage påvirker boardingtiden, men også for bedre at kunne sammenligne simuleringmodellen med teoretiske boardingmetoder beskrevet i litteraturen.

De mange forskellige funktioner i simuleringsmodellen gør, at boardingmetoderne kan testes ud fra flere forskellige parametre. Boardingmetoderne bliver i denne simuleringsmodel testet på, hvordan de påvirkes af mængden af håndbagage, og når passagerne ikke overholder reglerne. Disse parametre er valgt, da det igennem afhandlingen har været et fokus for flere af de undersøgte boardingmetoder. Simuleringmodellen tillader også at teste, hvordan boardingmetoderne bliver påvirket af ganghastighed og loadetid, men for at lave mere simple tests holdes de to parametre på en fast værdi.

Helt konkret vil der blive lavet 6 tests. De 3 bagagescenarier, som beskrives i punkterne herunder, undersøges først, hvor alle passagerne følger boardingmetodernes angivne rækkefølge, og bagefter, hvor 20% ikke følger reglerne. Når passagerne ikke følger reglerne i denne simulering, betyder det, at de ikke overholde deres plads i rækkefølgen.

- Passagerer kan medbringe 2 stykker håndbagage. Landeghem og Beuselinck fandt i deres undersøgelse fra 2001 ud af, at gennemsnitligt medbringer ca. 60% af passagerer 1 styk håndbagage og ca. 30% 2 stykker håndbagage, hvorfor dette vil være de andele, der også bruges for denne test³⁷.
- Passagerer kan medbringe 1 styk håndbagage. I dette tilfælde antages det, at 60% af passagerne medbringer håndbagage.
- Ingen passagerer medbringer håndbagage.

Tiden, som det tager at loade sin bagage, er sat til 5, og tiden som det tager at finde sin korrekte plads efter en sædeforstyrrelse, er sat til 7. Disse tider er baseret på andre videnskabelige artikler, som er simuleret boardingmetoder i NetLogo.³⁸ En passager bruger 1 tidsenhed til at gå et skridt eller loade et stykke håndbagage.

Simuleringerne er kørt for hver boardingmetode i hver af de 6 tests 50 gange for at få det mest præcise resultat. Boardingtider, statistiske udregner og forklarende grafer, som kan udledes fra simuleringskørslerne, kan findes i bilag G. Derudover er hele koden til simuleringsmodellen i bilag H, og kan køres i programmet NetLogo.

9.3 Simuleringsresultater

Simuleringsmodellens resultater bliver præsenteret i dette afsnit. Først undersøges resultaterne, når alle passagerne følger den rækkefølge, som de forskellige boardingmetoder angiver. Dernæst undersøges det, om resultaterne ændrer sig og i så fald, hvordan de ændrer sig, hvis ikke alle passagerer følger rækkefølgen. Til sidst undersøges de økonomiske konsekvenser af de forskellige boardingmetoder.

³⁷Landeghem & Beuselinck, 2001

³⁸bl.a. Delca, Cotfas & Paun, 2018

Forventningerne til simuleringresultaterne, når alle passagerer følger reglerne, er, at boardingtiderne følger resultaterne fra litteraturen, hvilket bl.a. betyder, at Steffens metode er den hurtigste og Back-to-Front er den langsomste. Derudover forventes det, at når passagerer ikke følger reglerne, vil de gennemsnitlige boardingtider stige for alle de boardingmetoder, som har en delvis eller høj grad af orden (Steffen, WMA og Reverse Pyramid). Omvendt forventes det, at boardingmetoder med lidt eller høj grad af tilfældighed ikke påvirkes af passagerer, som ikke følger reglerne. Forventningen til den økonomiske effekt af boardingmetoderne, er selvfølgelig, at jo langsommere en boardingmetode er, jo højere er omkostningerne.

9.3.1 Når alle passagerer følger rækkefølgen

Den gennemsnitlige boardingtid for de 5 boardingmetoder, når alle passagerer overholder boardingmetodernes angivne rækkefølge, er illustreret i figur 28. Den gennemsnitlige boardingtid er vist for hver boardingmetode i alle tre bagagescenarier.

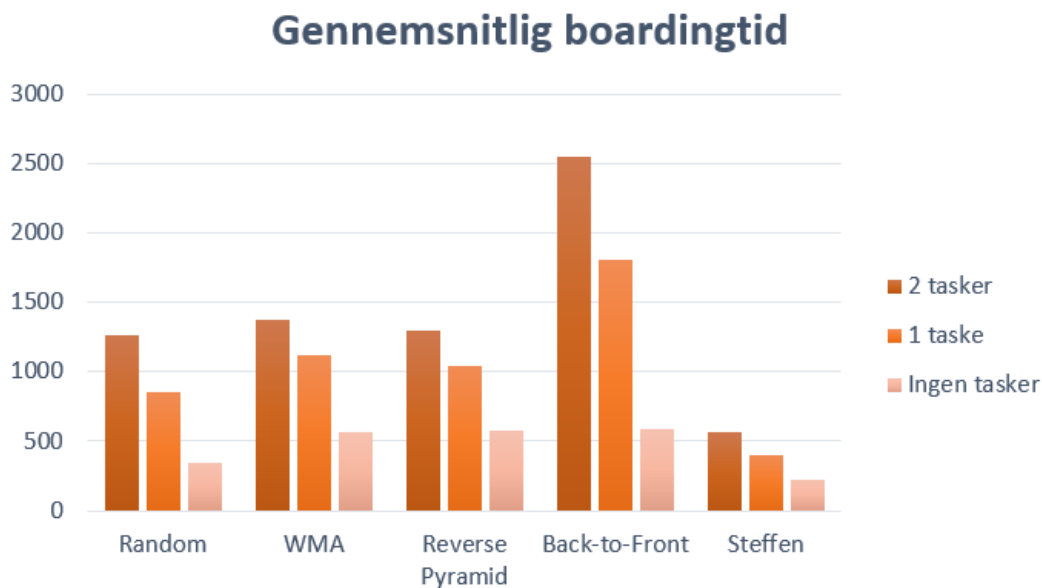


Figure 28: Gennemsnitlig Boardingtid for alle tre boardingscenarier

Fra figuren er det tydeligt, at den gennemsnitlige boardingtid i høj grad bliver påvirket af antallet af tasker, som passagerne har mulighed for at medbringe på deres flyrejse. Der er altså

ingen tvivl om, at flyselskaber har sparet mange penge på at indføre regler, hvor passagerer kun må medbringe en taske i kabinen. Gennemsnitligt bliver boardingtiden 26% langsommere for de 5 boardingmetoder, når passagerer må medbringe 2 stykker håndbagage sammenlignet med 1 styk håndbagage. Grafen er interessant, da den illustrerer, hvordan flyselskaberne teoretisk set har mulighed for at spare meget tid ved boarding, hvis de helt afskaffer håndbagage. Dette vil dog muligvis være til gene for passagerne, når omkostningerne for indchecket bagage i dag kan være høje, og passagerer kan medbringe håndbagage gratis³⁹.

Det er også tydeligt fra figuren, at Back-to-Front metoden er den langsomste, når passagerer kan medbringe både 1 og 2 tasker i kabinen. Disse resultater er ikke overraskende, da litteraturen beskriver metoden som en af de dårligste metoder. Resultaterne giver også god mening i forhold til, at kun få passagerer har mulighed for at loade deres bagage på samme tid i denne boardingmetode.

Det er derimod lidt overraskende, at metoden er tæt på at være lige så god som både WMA og Reverse Pyramid metoderne, når passagerne ikke må medbringe håndbagage ombord på flyet. Forklaringen kan være, at når passagerer ikke medbringer håndbagage ved Back-to-Front metoden, opstår der ikke lige så meget kø på grund af en reduktion i gangforstyrrelser.

Steffens metode er uden tvivl den hurtigste boardingmetode af de testede metoder, hvilket heller ikke kommer som en overraskelse. Steffens metode har en højere grad af orden i forhold til de andre metoder, hvorfor det var forventeligt, at metoden har hurtige boardingtider. Steffens metoden er især bedre, når passagerer må medbringe håndbagage, hvilket også giver god mening, eftersom Steffen lavede sin boardingmetode med det fokus, at den skulle tage hensyn til tiden, som passagerer bruger på at loade deres håndbagage.

Random, WMA og Reverse Pyramid metoderne har nogenlunde lige lange gennemsnitlige boardingmetoder, og især Reverse Pyramid og WMA ser ud til at være ens. Alle tre metoder tillader passagerer at boarde langs kabinegangen på samme tid, og dermed kan mange loade deres bagage samtidig og sandsynligheden for, at to passagerer har tilstødende rækker er lille. Derfor

³⁹travelmarket

giver det også mening, at de har ens boardingtider.

Boardingmetoden Random er også i høj grad påvirket af antallet af håndbagage. Selvom passagerer boarder i en rækkefølge, som betyder, at de bliver fordelt ud igennem kabinegangen, er der større sandsynlighed for, at passagerer har tilstødende rækker, og at der dermed kan forekomme gangforstyrrelser.

Boardingmetoderne opfører sig meget forskelligt i simuleringskørslerne. Nogle er mere stabile, hvilket betyder, at boardingtiderne er stort set de samme i alle simuleringskørsler, og andre er varierende. Tabellen nedenfor illustrerer den hurtigste og langsomste boardingtid for hver boardingmetode i simuleringskørslerne. Den viser også den procentvise forskel mellem den hurtigste (min.) og langsomste (maks.) simuleringskørsel for alle boardingmetoderne. Tabellen er vist for boardingscenariet, hvor passagerer må medbringe en taske.

Metode	Random	WMA	Reverse Pyramid	Back-to-Front	Steffen
Min.	1055	1149	1117	2180	508
Maks.	1544	1547	1524	3005	631
% forskel min. og maks.	27%	11%	11%	6%	19%

Tabellen illustrere, at især boardingstrategien Random har meget varierende boardingtider, hvilket også giver god mening, da rækkefølgen, som passagerer boarder fly på, skifter ved hver simuleringskørsel. Derimod har boardingmetoden Back-to-Front meget stabile boardingtider. Tabellens resultater kan være brugbare for luftfartssektoren, da man kan få en indikation omkring, hvor meget boardingmetodernes boardingtider kan variere, og dermed gøre det lettere at planlægge ground handling.

9.3.2 Når passagerne ikke følger reglerne

Den gennemsnitlige boardingtid for de fem boardingmetoder er vist i figur 29. Denne figur ligner næsten til forveksling figur 28, hvilket heller ikke er overraskende. Når det kun er en andel på 20% af passagerne, som ikke følger reglerne, burde det ikke ændre boardingtiderne meget. Det er dog værd at bemærke, at Steffens metode ser ud til at være steget en smule, hvilket også var forventeligt.

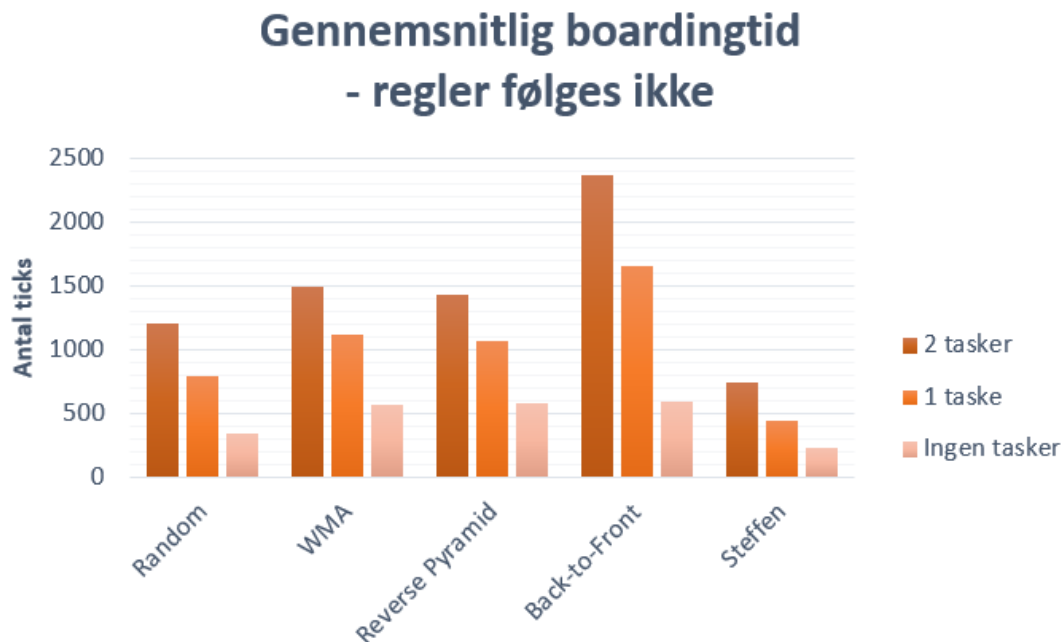


Figure 29: Gennemsnitlige boardingtider når 20% passagerer ikke følger reglerne

Forskellen i boardingtiderne, når reglerne følges, og når de ikke følges er vist i figur 30. For at simplificere figuren er scenariet, hvor passagerne kan medbringe en taske valgt.

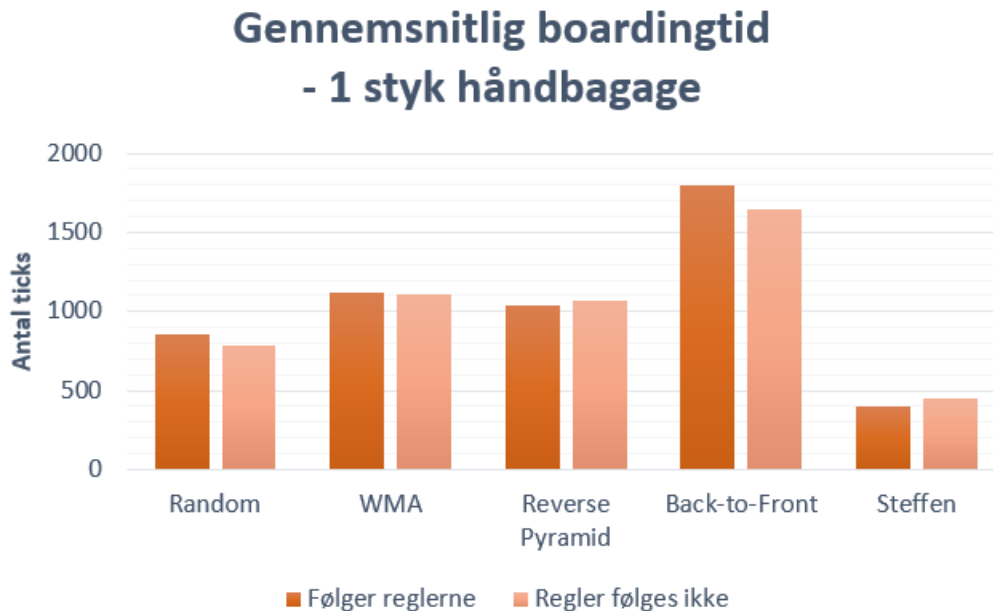


Figure 30: Sammenligning af gennemsnitlige boardingtider når reglerne følges og ikke følges. 60% passagerer har 1 taske med

Forventningen om, at de tre metoder, som har en grad af orden, WMA, Reverse Pyramid og Steffen, alle tre har langsommere boardingtider, når 20% af passagerne ikke følger reglerne, holder ikke helt. WMA's boardingtider er ikke steget, men forbliver det samme. WMA er altså ikke påvirket af, at 20% af passagerne ikke overholder rækkefølgen, når de medbringer en taske, det vil dog stadig forventes, at boardingtiden stiger, hvis yderligere passagerer ikke følger reglerne.

Back-to-Front metoden bliver hurtigere, når 20% af passagerne er uden for rækkefølgen. Det kan skyldes, at passagerne bliver spredt mere ud gennem flykabinen, når de boarder flyet. Det gør, at flykabinen ikke i lige så høj grad bliver et udvidet venteområde. Forventningen til boardingmetoden Random var, at den ville forblive den samme, men boardingtiden er også blevet hurtigere. Årsagen kan være, at rækkefølgen er mere effektiv når passagerne ikke følger reglerne, da det er en anden tilfældig rækkefølge.

Det illustreres også hvilken påvirkning ingen og 2 tasker har ved Random og Steffens metode i figur 31 og figur 32.

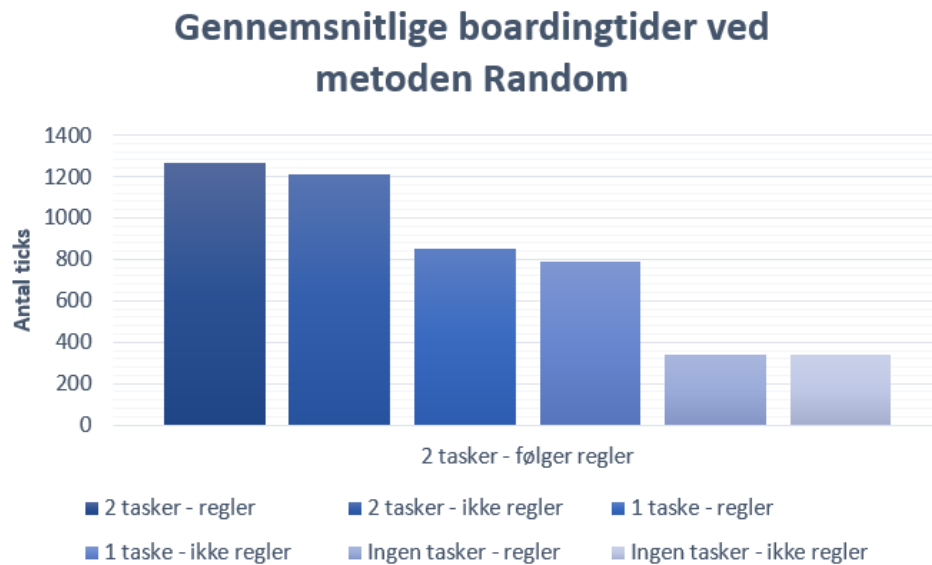


Figure 31: Gennemsnitlige Boardingtider for boardingmetoden Random

Boardingmetoden Random har meget ens boardingtider uanset antallet af håndbagage og boardingmetoden er dermed ikke påvirket meget af passagerer som ikke følger reglerne, uanset antallet af håndbagage som passagerne medbringer.

Omvendt bliver Steffens boardingtider påvirket, jo mere håndbagage passagerne kan medbringe, jo større forskel er der på boardingtiden, når passager følger reglerne, og når de ikke følger reglerne. Hvilket giver mening, da mere håndbagage giver flere gangforstyrrelser.

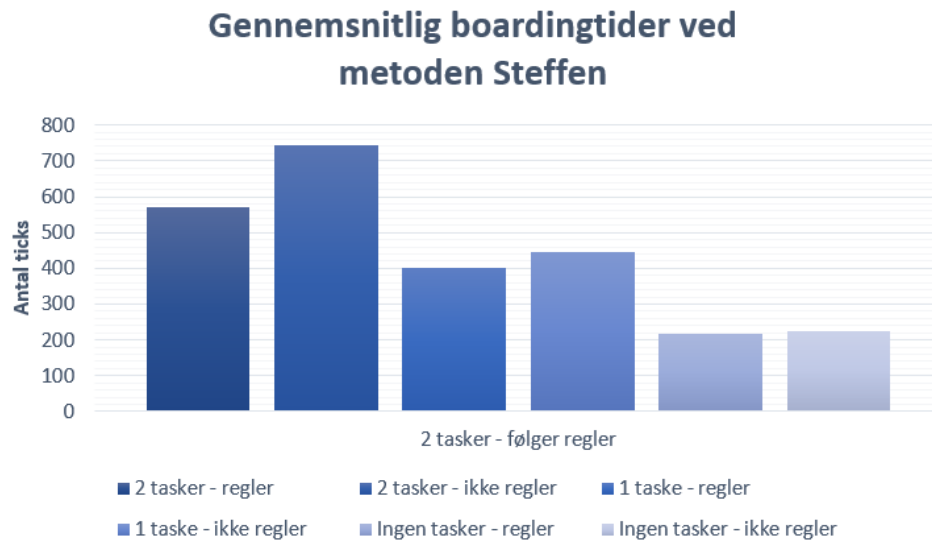


Figure 32: Gennemsnitlige Boardingtider for boardingmetoden Steffen

Både WMA og Reverse Pyramid har resultater (som kan ses i bilag D og E), som ligner Stefens resultater i figur 32, hvilket de også burde da passagerer følger en bestemt rækkefølge i alle boardingmetoderne. Back-to-Front metoden har bedre boardingtider for alle bagagescenarier, når reglerne ikke følges, hvilket er vist i bilag F.

Resultaterne for passagerer, som ikke overholder reglerne, stemmer også overens med resultaterne i Zeineddines artikel som blev udforsket i afsnit 7.3 (Passagerer som ikke overholder boarding regler). Analysen kan dermed understøtte, at hvis et flyselskab vælger en boardingmetode med en høj grad af orden, da giver det mening at inddrage en metode til at håndtere passagerer, som ikke følger reglerne i flyselskabets boardingstrategi.

9.3.3 Boardingmetodernes omkostninger

Årsagen til at flyselskaber ønsker kortere boardingtider, er at en reduktion af TAT vil kan give økonomiske besparelser for flyselskaber. Det er derfor interessant at forsøge at undersøge, hvilke omkostninger de forskellige boardingmetoder kan få for et flyselskab. Nyquist og McFadden har præsenteret en formel i deres artikel "*A study of the airline boarding problem*", som kan give et bud på, hvordan man finder de årlige omkostninger for TAT på baggrund af boarding. TATs årlige omkostning kan udregnes ved følgende udtryk

$$C = ((B \cdot M) \cdot D) \cdot 365 \quad (14)$$

Hvor C er årlige omkostninger, B er den gennemsnitlige boardingtid i minutter, M er omkostning per minut på jorden (når flyet ikke er i luften) og D er gennemsnitlige antal daglige fly.

Det koster et flyselskab \$78 (ca. 483 kr.) at have et fly på jorden per minut. Derudover antages, at et flyselskab med en stor flyflåde har 1.000 flyvninger om dagen.⁴⁰ Det antages i Nyquist og McFadden's model, at et flyselskab har det samme antal fly i luften hver dag og flyver alle 365 dage om året.

Ticks oversættes til sekunder og minutter ligesom Delcea, Cotfas og Paun gør i deres artikel "*Agent-Based Evaluation of the Airplane Boarding Strategies' Efficiency and Sustainability*", hvor hvert tick er svarende til 5,4 sekunder i den virkelige verden.⁴¹

Der er taget udgangspunkt i resultaterne for simuleringen, hvor 60% af passagerne medbringer en taske, og hvor alle passagerne overholder reglerne. De årlige omkostninger for et flyselskab med de forskellige boardingmetoder er vist i nedenstående tabel.

⁴⁰Kalic, Markovic & Kuljanin, 2013

⁴¹Delcea, Cotfas & Paun, 2018

Boarding metode	Årlige omkostninger (mio. kr.)
Random	464
WMA	609
Reverse Pyramid	565
Back-to-Front	980
Steffen	218

Det skal understreges, at omkostninger er beregnet ud fra simuleringerne og derfor kan omkostningerne kun sammenlignes i simuleringsmiljøet. Det er stadig interessant at undersøge, selvom boardingtiderne fra simuleringsmetoderne giver en del hurtigere boardingtider end de forventlige 30-60 minutter.

Det er åbenlyst, at metoden med den laveste boardingtid (Steffen) også giver de største økonomiske besparelser. Der er en årlig besparelse på 762 mio. kr. ved at bruge Steffens metode frem for den langsomste boardingmetode Back-to-Front. På grund af Back-to-Fronts simplicitet, og at den giver lov til at boarde passagerer i grupper, er det sandsynligt, at flere flyselskaber bruger denne metode, selvom den giver langsomme boardingtider og høje omkostninger. Hvis et flyselskab ønsker en simpel boardingmetode ligesom Back-to-Front er, giver det mere mening at vælge boardingmetoden Random. Flyselskaber kan spare 515 mio. kr. årligt ved at vælge Random fremfor Back-to-Front ud fra disse beregninger.

Til beregningen af TAT kommer selvfølgelig også personale, som skal hjælpe passagerne med at boardet flyet. Selvom Steffens metode er den hurtigste, da kræver metoden også mere personale til at hjælpe passagerne med at overholde den korrekte rækkefølge, hvorimod Random kun kræver personale, som tjekker passagerens boardingpas inden de boarder et fly. Beregningerne, som er lavet på baggrund af simuleringerne, kan dermed ikke stå alene, men det skal indgå i en større analyse, før den korrekte pris for en boardingmetode kan beregnes.

Disse beregninger understøtter dog, at valget af boardingstrategi kan have stor betydning for et flyselskabs økonomiske omkostninger og vigtigheden i at vælge den korrekte boardingstrategi.

10 Konklusion

Selvom problemformuleringen for denne afhandling kan virke meget simpel, er det svært at konkludere, hvilken boardingmetode der er den optimale.

Simuleringen gav det eksplicitte svar, at det var Steffens boardingmetode, som har en høj grad af orden, der havde den hurtigste boardingtid, uanset hvilket scenarie som blev testet. Dette er også det svar, som er at finde i den videnskabelige litteratur. Metoden har dog ulemper, der skal tages højde for. Den kræver nemlig en skarp kontrol fra flyselskabets personale for at sikre, at passagerne overholder den angivne rækkefølge. Derudover er metoden også kun lavet til små fly, som boarder direkte fra gaten, og den tager ikke hensyn til passagerer, der rejser i grupper. Metoden kan dermed ikke siges at være optimal kun på baggrund af hurtige boardingtider. Selvom flyselskaberne kan spare penge på hurtige TAT tider, så er det ikke sikkert, at det kan svare sig, hvis de skal bruge yderligere omkostninger på personale, og hvis passagertilfredsheden falder, fordi passagerne ikke kan boarde gruppevis.

Det er ikke kun Steffens metode, som har mangler, da samtlige boardingmetoder generelt set ikke opfylder alle aspekter i boardingprocessen. Der er altså huller i de allerede eksisterende boardingmetoder, som stadig mangler at blive undersøgt. Det blev understreget i studierne af prioriteringsboardere og passagerer, som ikke overholder rækkefølgen, da disse passagergrupper kan ødelægge enhver effektiv boardingmetode. Det er derfor vigtigt, at undersøge forskellige hændelser ved boarding, når en strategi skal vælges.

Selvom der findes mange teoretiske boardingstrategier, og mange flere end denne afhandling har præsenteret, som flyselskaberne kan indføre, da udnyttes det ikke altid. Simuleringerne og litteraturen har vist, at boardingmetoden Random er meget anvendelig og opfylder passagerens krav til at boarde i grupper. Derudover bliver den ikke påvirket af ændringer i boardingsekvensen. Det giver derfor mening, at mange flyselskaber boarder passagerer i en orden, som ikke omhandler, hvor meget håndbagage passagerne medbringer, eller hvilken plads man har i flyet. I stedet fokuseres der på deres status hos flyselskabet, og hvor mange penge de har brugt på deres flybillet

(prioritetsbilletter). Det er en balancegang, der skal tages hensyn til, for hurtigere og mere effektiv boarding sparer flyselskaberne penge og tid, men givende loyalitet, selv på bekostning af andre passagerers tid eller komfort, kan være mere profitabel for flyselskaberne i det lange løb.

Selvom der ikke kan gives et entydigt svar på, hvilken boardingmetode, som er den mest optimale, er resultaterne for de forskellige boardingmetoder værdifulde. En vellykket og effektiv boardingmetode kan være behjælpelig med information, som kan føre til forbedringer i en allerede eksisterende boardingstrategi eller til at lave nye effektive boardingmetoder.

Den optimale boardingstrategi er den, som kan opfylde krav hos flere parter. Det gælder altså om at finde et trade-off, hvor flyselskaberne har en effektiv boarding, som ikke medfører omkostninger, men som også er komfortabel for alle passagerer.

Kravene til lufttrafikken og dermed også boarding ændrer sig med tiden, ligesom der opstår nye teknologiske muligheder. Flyselskaberne bliver dermed også nødt til at være omstillingsparate og nytænkende i deres måde at boarde passagerer på for at følge med udviklingen. Der bliver derfor løbende præsenteret nye boardingmetoder i litteraturen.

Covid-19 pandemien har vist, hvordan der pludseligt og meget hurtigt kan ændres i de allerede eksisterende boardingteknikker. Derudover kan det også tænkes, at der kommer nye metoder efter pandemien, da der er kommet meget mere fokus på hygiejne alle steder i samfundet, hvilket muligvis også rammer flybranchen.

Alle undersøgelserne i afhandlingen bygger på simuleringer og teoretisk viden, men det kunne være interessant at teste metoderne ude i den virkelige verden og se om de samme resultater kan opnås.

11 Litteratur

Bøger

1. Norman J. Ashford, H.P. Martin Stanton, Clifton A. Moore, Pierre Coutu & John R. Bessley: *Airport Operations - Third Edition*. MC, Graw, Hill, 2013
2. Frederick S. Hillier & Gerald J. Lieberman: *Introduction to Operations Research - Tenth Edition*. MC, Graw, Hill, 2015

Videnskabelige artikler

1. Steffen J. H. (2008). Optimal boarding method for airline passengers. *Journal of Air Transport Management*, Volume 14, Issue 3, s. 146-150
2. Landeghem H. V. & Beuselinck A. (2002). Reducing passenger boarding time in airplanes: A simulation based approach. *European Journal of Operational Research*, 142, s. 294-308
3. Jaehn F. & Neumann S. (2014). Airplane boarding. *European Journal of Operational Research*, 244, s. 339-344
4. Hutter L., Jaehn F. & Neumann S. (2019). Influencing factors on airplane boarding times. *Omega*, Volume 87, s. 177-190
5. Menkes H. L., van den Briel J, Villalobos R., Hogg L. G., Lindemann T. & Mulé A. V. (2005). America West Airlines Develops Efficient Boarding Strategies. *Interfaces*, Vol. 35, No. 3, s. 191-201
6. Ferrari P. & Nagel, K. (2005). Robustness of Efficient Passenger Boarding Strategies for Airplanes. *Journal of the Transportation Research Board*, Volume 1915, issue 1, s. 44-54
7. Notomista G., Selvaggio, M., Sbrizzi, F., Du Maio, G., Grazioso, S. & Botsch, M. (2016). A fast airplane boarding strategy using online seat assignment based on passenger classification. *Journal of Air Transport Management*, 53, s. 140-148

8. Milne R. J. & Kelly A. R. (2013). A new method for boarding passenger onto an airplain. *Journal of Air Transport Management*, 34, s. 93-100
9. Milne R. J., Cotfas L., Delcea C., Saleri M., Cráciun L. & Molánescu A. G. (2020). Airplane Boarding Method for Passenger Groups When using Apron Buses. *IEEE*, Volume 8, s. 18019-18035
10. Kisiel T. (2020). Resilience of passenger boarding strategies to priority fares offered by airlines. *Journal of Air Transport Management*, 87, s. 1-9
11. Zeineddine H. (2021). Reducing the effect of passangers' non-compliance with aircraft boarding rules *Journal of Air Transport Management*, 92, s. 1-10
12. Schultz M. & Soolaki M. (2021). Analytic approach to solve the problem of aircraft passenger boarding during the coronavirus pandemic. *Transportation Research Part C* 124, s. 1-17
13. Milne R. J., Delcea C. & Cotfas L. (2021). Airplane boarding methods that reduce risk form COVID-19. *Safety Science*, 134, s. 1-13
14. Delcea C., Cotfas L & Paun R. (2018). Agent-Based Evaluation of the Airplane Boarding Strategies' Efficiency and Sustainability. *MDPI*, volume 10, issue 6, s. 1-26
15. Macal C. M. & North M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation *IEEE*, s. 2-13
16. Milica K., Markovic B. & Kuljanin J. (2013). The airline boarding problem: simulation based approach from different players' perspective. *Conference: LOGIC*
17. Delcea C., Cotfas L & Paun R. (2018). Agent-Based Evaluation of the Airplane Boarding Strategies' Efficiency and Sustainability. *MDPI*, volume 10, issue 6, s. 1-26

Avisartikler

1. Frost N., 2020, *How Covid-19 could change plane boarding*
URL: <https://www.bbc.com/worklife/article/20200612-why-coronavirus-will-change-how-we-board-a-plane>
2. Betak J., 2012, *Guide til håndbagage-regler på fly*,
URL: <https://www.berlingske.dk/rejser/guide-til-haandbagage-regler-paa-fly>

Hjemmesider

1. CPH, 2021, *Dårligste år siden 1970: CPH mistede 22,7 mio. passagerer*, besøgt d. 20. marts fra:
URL: <https://www.cph.dk/om-cph/investorer/trafikstatistik/2021/1/ny%20sided%C3%A5rligste%20%C3%A5r%20siden%201970%20cph%20mistede%20227%20mio.%20passagerer>
2. travelmarket, *Guide til flyselskabernes gebyrer*, besøgt d. 30. april fra:
URL: <https://www.travelmarket.dk/blog/gebyroversigt/>
3. NetLogo, *Programming Guide*, besøgt d. 27. april fra:
URL: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/2.0/docs/programming.html>
4. Inspirationkilde 1: NetLogo, besøgt d. 2. april fra:
URL: <http://www.simulace.info/images/Boarding.nlogo>
5. Inspirationkilde 2: NetLogo, besøgt d. 2. april fra:
URL: http://modelingcommons.org/browse/one_model/5316#model_tabs_browse_procedures
6. Inspirationkilde 3: NetLogo, besøgt d. 2. april fra:
URL: https://lameo.github.io/AMBS-Optimizing_Aircraft_Boarding_Methods/

12 Bilag

12.1 Bilag A

Subscripts

$g \in G$	Gruppe af passagerer som rejser sammen eller alene
$b \in B$	De to busser
$r \in R$	Rækker i flyet

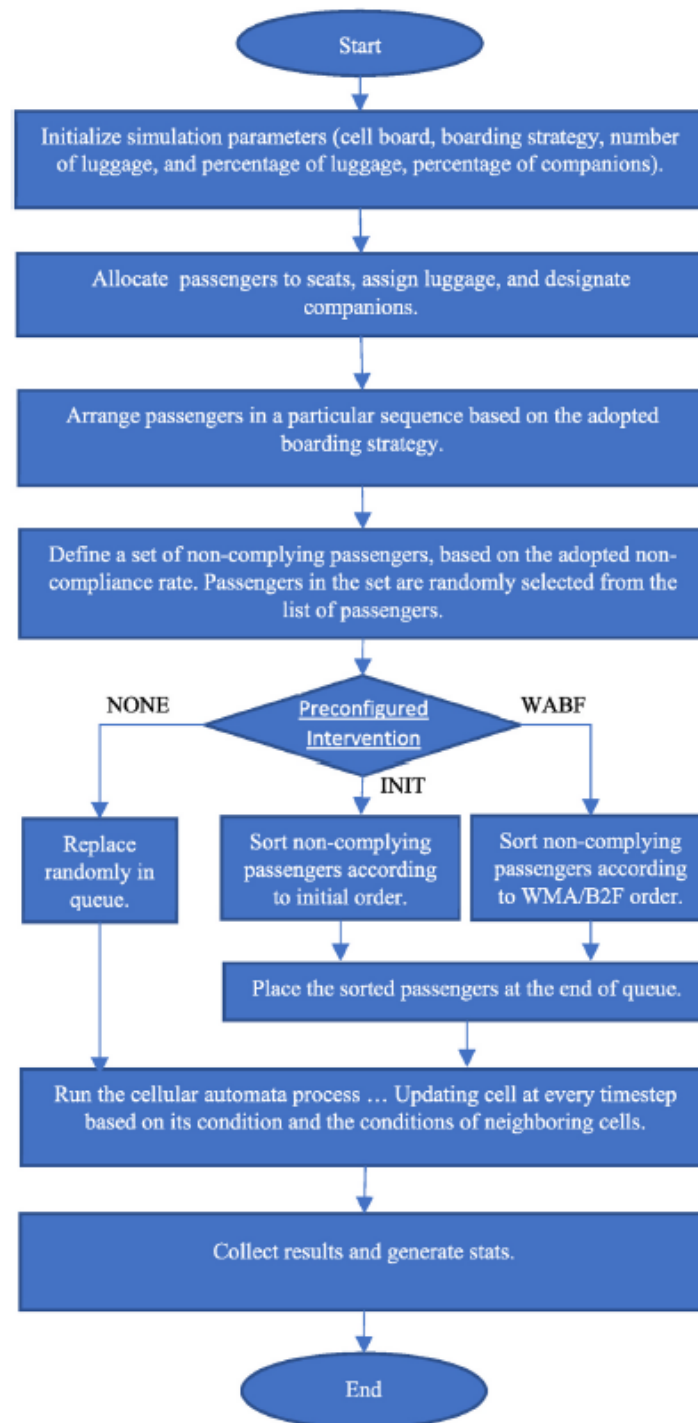
Parametre

N_g	Antal passagerer i gruppe g (En gruppe kan også have 1 passager)
W_{gr}^a	Antal vinduesædepassagerer i gruppe g , som støder op til en midtersædepassager i række r , som ikke er i gruppe g
W_{gr}^b	Antal af vinduesædepassagerer i gruppe g , som støder op til en midtersædepassager i række r som er en del af gruppe g , men passageren i midtersædet støder op til en gangsåde passager, som ikke er en del af gruppe g
A_{gr}^a	Antal af gangsådepassagerer i gruppe g , som støder op til en midtersædepassagerer i række r , som ikke er en del af gruppe g
A_{gr}^b	Antal af gangsådepassagerer i gruppe g , som støder op til en midtersædepassager i række r som er en del af gruppe g , men passageren i midtersædet støder op til en vinduesædepassager som ikke er en del af gruppe g
NR_{gr}	Antal passagerer fra gruppe g som sidder i række r
$TARGET_r$	Målet for antallet af passagerer i række r som burde tildeles til den første bus: dette mål er det antal passagerer der er tildelt til den første bus i række r igennem Mixed-WilMA-RP metoden
WA_r	Vægt for at belønne forekomster af W_{gr}^a , som er tildelt til den første bus
WB_r	Vægt for at belønne forekomster af W_{gr}^b , som er tildelt til den første bus
AA_r	Vægt for at belønne forekomster af A_{gr}^a , som er tildelt til den anden bus
AB_r	Vægt for at belønne forekomster af A_{gr}^b , som er tildelt til den anden bus
αs_r	Vægt for at straffe hver passager i første bus, ved ikke at opnå målet $TARGET_r$
αe_r	Vægt for at straffe hver passager i første bus ved at overskride målet $TARGET_r$

Beslutningsvariable

X_{gb}	1 hvis gruppe g er tildelt til bus b ; 0 ellers
S_r	Antal mangel for $TARGET_r$ for række r af den første transferbus
E_r	Antal overskridelse for $TARGET_r$ for række r af den første transferbus
F	Antallet af passagerer i første halvdel af flyet (række 1-15) til den første transferbus, som er mere end antallet af passagerer i den bagerste halvdel af flyet (række 16-30), der er tildelt den første transferbus
Z	Antallet af passagerer i første halvdel af flyet (række 1-15) til den første transferbus, som er mindre end antallet af passagerer i den bagerste halvdel af flyet (række 16-30), der er tildelt den første transferbus

12.2 Bilag B



12.3 Bilag C

Bilag C.1: Gennemsnitlig gangsåde risiko ved 1 meter (Milne, Delcea & Cotfas, 2021):

Boarding method	Aisle distancing: 1 m						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Baseline 1: Back-to-front by row	984	900	786	725	682	625	602
Baseline 2: Modified reverse pyramid half zone	1,741	1,655	1,537	1,440	1,336	1,196	1,034
Back-to-front by row – WilMA	188	149	114	83	64	48	36
Back-to-front by row – WilMA – offset 2	189	148	114	84	66	49	36
Back-to-front by row – WilMA – offset 3	188	150	112	85	64	47	36
Back-to-front by row – WilMA – offset 4	188	145	111	83	64	48	36
Back-to-front by row – WilMA – offset 5	188	149	113	84	65	48	36
Back-to-front by row – WilMA – offset 6	189	149	113	85	63	48	36

Bilag C.2: Gennemsnitlig vinduesæde risiko ved 1 meter (Milne, Delcea & Cotfas, 2021):

Boarding method	Aisle distancing: 1 m						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Baseline 1:	714	602	511	426	382	336	307
Back-to-front by row							
Baseline 2:	7,232	6,808	6,473	6,055	5,562	5,009	4,268
Modified reverse pyramid half zone							
Back-to-front by row – WilMA	871	691	535	398	315	238	180
Back-to-front by row – WilMA – offset 2	1,352	1,162	991	835	716	614	528
Back-to-front by row – WilMA – offset 3	1,746	1,554	1,359	1,181	1,038	905	799
Back-to-front by row – WilMA – offset 4	2,142	1,923	1,717	1,522	1,350	1,202	1,063
Back-to-front by row – WilMA – offset 5	2,530	2,319	2,077	1,873	1,674	1,491	1,320
Back-to-front by row – WilMA – offset 6	2,936	2,692	2,446	2,210	1,982	1,772	1,570

Bilag C.3: Gennemsnitlig antal af sædeforstyrrelser ved 1 meter (Milne, Delcea & Cotfas, 2021):

Boarding method	Aisle distancing: 1 m						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Baseline 1: Back-to-front by row	30	30	29	30	31	30	31
Baseline 2: Modified reverse pyramid half zone	0	0	0	0	0	0	0
Back-to-front by row – WilMA	0	0	0	0	0	0	0
Back-to-front by row – WilMA – offset 2	0	0	0	0	0	0	0
Back-to-front by row – WilMA – offset 3	0	0	0	0	0	0	0
Back-to-front by row – WilMA – offset 4	0	0	0	0	0	0	0
Back-to-front by row – WilMA – offset 5	0	0	0	0	0	0	0
Back-to-front by row – WilMA – offset 6	0	0	0	0	0	0	0

Bilag C.4: Gennemsnitlig boardingtid ved 2 meter (Milne, Delcea & Cotfas, 2021):

Boarding method	Aisle distancing: 2 m						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Baseline 1: Back-to-front by row	1,891	1,769	1,653	1,548	1,436	1,299	1,120
Baseline 2: Modified reverse pyramid half zone	1,416	1,367	1,312	1,260	1,168	1,052	853
Back-to-front by row – WilMA	1,608	1,501	1,400	1,314	1,217	1,085	836
Back-to-front by row – WilMA – offset 2	1,610	1,504	1,395	1,312	1,218	1,086	836
Back-to-front by row – WilMA – offset 3	1,406	1,359	1,310	1,262	1,187	1,065	836
Back-to-front by row – WilMA – offset 4	1,407	1,357	1,308	1,264	1,179	1,062	836
Back-to-front by row – WilMA – offset 5	1,414	1,372	1,315	1,262	1,182	1,063	836
Back-to-front by row – WilMA – offset 6	1,421	1,369	1,316	1,262	1,178	1,060	836

Bilag C.5: Gennemsnitlig antal sædeforstyrrelser ved 2 meter (Milne, Delcea & Cotfas, 2021):

Boarding method	Aisle distancing: 2 m						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Baseline 1: Back-to-front by row	30	30	30	30	30	30	31
Baseline 2: Modified reverse pyramid half zone	0	0	0	0	0	0	0
Back-to-front by row – WilMA	0	0	0	0	0	0	0
Back-to-front by row – WilMA – offset 2	0	0	0	0	0	0	0
Back-to-front by row – WilMA – offset 3	0	0	0	0	0	0	0
Back-to-front by row – WilMA – offset 4	0	0	0	0	0	0	0
Back-to-front by row – WilMA – offset 5	0	0	0	0	0	0	0
Back-to-front by row – WilMA – offset 6	0	0	0	0	0	0	0

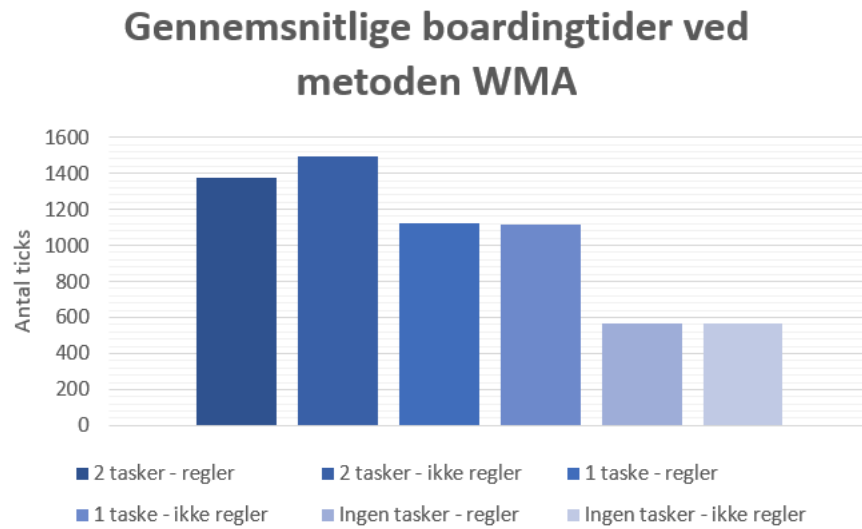
Bilag C.6: Gennemsnitlig gangsåde risiko ved 2 meter (Milne, Delcea & Cotfas, 2021):

Boarding method	Aisle distancing: 2 m						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Baseline 1: Back-to-front by row	996	894	799	724	667	613	599
Baseline 2: Modified reverse pyramid half zone	1,679	1,584	1,505	1,400	1,294	1,153	1,045
Back-to-front by row – WilMA	189	148	115	83	65	48	36
Back-to-front by row – WilMA – offset 2	186	148	112	84	64	48	36
Back-to-front by row – WilMA – offset 3	187	148	115	84	65	48	36
Back-to-front by row – WilMA – offset 4	190	148	113	85	64	48	36
Back-to-front by row – WilMA – offset 5	188	147	113	83	64	47	36
Back-to-front by row – WilMA – offset 6	187	148	114	85	65	48	36

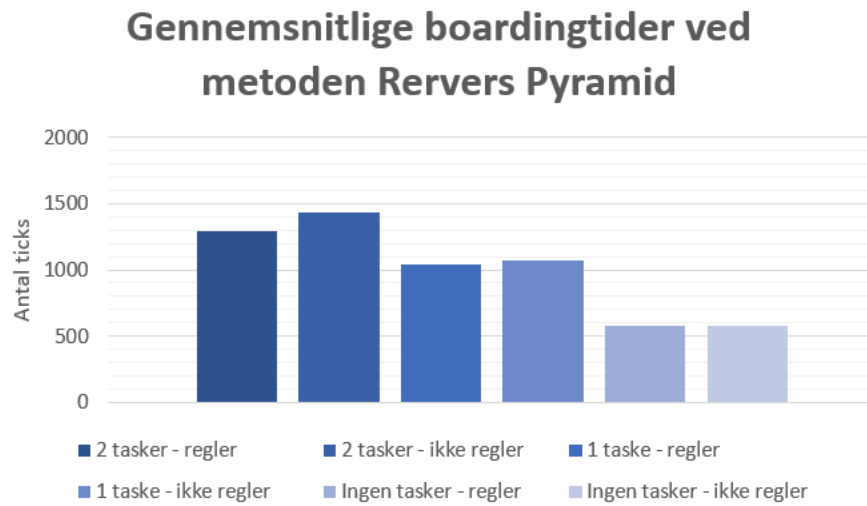
Bilag C.7: Gennemsnitlig vinduesæde risiko ved 2 meter (Milne, Delcea & Cotfas, 2021):

Boarding method	Aisle distancing: 2 m						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Baseline 1: Back-to-front by row	712	600	509	425	380	335	300
Baseline 2: Modified reverse pyramid half zone	6,959	6,652	6,266	5,906	5,435	4,904	4,283
Back-to-front by row – WilMA	871	693	536	400	315	238	180
Back-to-front by row – WilMA – offset 2	1,327	1,145	974	825	709	611	528
Back-to-front by row – WilMA – offset 3	1,687	1,501	1,322	1,159	1,023	898	799
Back-to-front by row – WilMA – offset 4	2,064	1,864	1,667	1,495	1,328	1,188	1,063
Back-to-front by row – WilMA – offset 5	2,427	2,220	2,013	1,819	1,626	1,465	1,320
Back-to-front by row – WilMA – offset 6	2,793	2,567	2,351	2,144	1,926	1,735	1,570

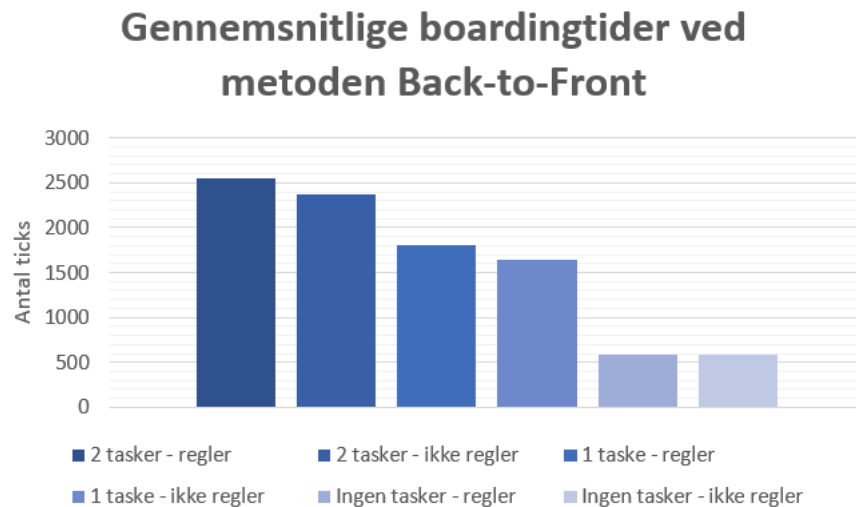
12.4 Bilag D



12.5 Bilag E



12.6 Bilag F



12.7 Bilag G

Se resultater for simuleringskørsler i vedlagte Excelark.

12.8 Bilag H

Simulering er også vedhæftet i en NetLogo fil. Både koden og interfacet skal bruges før simuleringen kan køres, hvorfor det er nødvendigt, at have filen.

Både det relevante interface og kode fremgår i bilaget herunder.

Setup

Go

Go forevigt 

Andel-fly-optaget 100 %

boardingmetode
Steffen ▼

Med-bagage 0 %

Andel-med-to-tasker 0 %

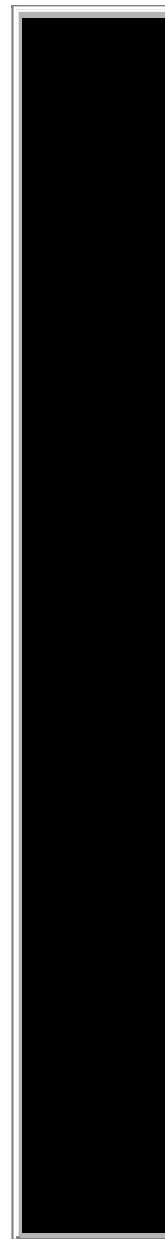
Gnm-loadetid 5 sek

Andel-følger-ikke-regler 20 %

Tid-til-korrekt-sæde 7 sek

Passagerer som ikke har fundet sin plads
0

counter
229



```

; Globale variable
globals [
  antal-passagerer
  sæde-allokering
  temp
  koordinater-random
  koordinater-wma
  koordinater-reverse-pyramid
  koordinater-back-to-front
  koordinater-steffen
]

; Agenter er her passagerne
breed [passagerer passager]

; Egenskaber for passagerne
passagerer-own [
  gotoX gotoY ;sædenummer
  bagagemængde
  bagage-status
  bagage-loadetid
  vent-sæde-optaget
]

patches-own[
  bagage-på-bagagehylde
]

to setup
  clear-all
  reset-ticks
  set antal-passagerer round(120 * (andel-fly-optaget / 100)) ;flyet er automatisk
  helt fyldt medmindre man sætter det til andet
  set counter 0 ; boardingtid (I simuleringen bruges antal tick + ventetid)
  setup-fly
  setup-passagerer antal-passagerer
  setup-sæde-allokering
end

to go
  ifelse count (passagerer with [color = cyan]) != antal-passagerer [
    arrive
    set counter counter + 1
    tick
  ]
  [stop]
end

; Flyet opsættes (120 passagerer fordelt på 20 rækker)
to setup-fly
  resize-world -10 10 -6 6
  set-patch-size 35
  ask patches [
    set pcolor 8
  ]

```



```

]
ask patches [
  if pycor = 0 [set pcolor 6]
  if (pycor >= 1 and pycor <= 3) or (pycor >= -3 and pycor <= -1) and pxcor > -10
[set pcolor blue]
  if ((pycor >= 1 and pycor <= 3) or (pycor >= -3 and pycor <= -1)) and
  (pxcor mod 2 = 0) and pxcor > -10 [set pcolor sky]
  if (pycor = 0 and pxcor > -10) [set plabel pxcor + 10]
  if pycor = 3 and pxcor > -10 [set plabel "A"]
  if pycor = 2 and pxcor > -10 [set plabel "B"]
  if pycor = 1 and pxcor > -10 [set plabel "C"]
  if pycor = -1 and pxcor > -10 [set plabel "D"]
  if pycor = -2 and pxcor > -10 [set plabel "E"]
  if pycor = -3 and pxcor > -10 [set plabel "F"]
]
end

```

```

; Laver passagerne
to setup-passagerer [amount]

  create-passagerer amount [
    setxy min-pxcor 0
    set heading 90
    set baggage-status false
    set color violet
    set shape "person"
  ]
  ask n-of (round ((med-bagage) * amount / 100)) passagerer [
    ifelse random-float 1 < (andel-med-to-tasker / 100) [
      set bagagemængde 2
      set color orange
      set shape "person"
    ] [
      set bagagemængde 1
      set color yellow
      set shape "person"
    ]
    set baggage-status true
    set baggage-loadetid -1
  ]
end

```

```

; Alt efter hvilken metoder passagerne boarder flyet, ankommer personerne til deres
plads
to arrive

```

```

; sæde-allokering

```

```

if boardingmetode = "Random" [

  (foreach (sort passagerer) koordinater-random [ [?1 ?2] ->
    ask ?1 [
      set gotoX item 0 ?2
      set gotoY item 1 ?2
      occupy-sæder
    ]
  ]

```

```

    ]
  })
]
if boardingmetode = "WMA" [

  (foreach (sort passagerer) koordinater-wma [ [?1 ?2] ->
    ask ?1 [
      set gotoX item 0 ?2
      set gotoY item 1 ?2
      occupy-sæder
    ]
  })

]

if boardingmetode = "Reverse Pyramid" [
  (foreach (sort passagerer) koordinater-reverse-pyramid [ [?1 ?2] ->
    ask ?1 [
      set gotoX item 0 ?2
      set gotoY item 1 ?2
      occupy-sæder
    ]
  })
]

if boardingmetode = "Back-to-Front" [
  (foreach (sort passagerer) koordinater-back-to-front [ [?1 ?2] ->
    ask ?1 [
      set gotoX item 0 ?2
      set gotoY item 1 ?2
      occupy-sæder
    ]
  })
]

if boardingmetode = "Steffen" [
  (foreach (sort passagerer) koordinater-steffen [ [?1 ?2] ->
    ask ?1 [
      set gotoX item 0 ?2
      set gotoY item 1 ?2
      occupy-sæder
    ]
  })
]

end

to setup-sæde-allokering

  set koordinater-random shuffle [[-6 3] [-6 2] [-2 -2] [7 -1] [0 2] [0 -3] [1 1]
[2 1] [10 3] [3 1] [7 -2] [-5 -2] [-5 -3] [3 -3] [3 -1] [3 -2] [-8 -1] [-8 3] [8 3]
[9 3] [9 2] [-6 1] [-2 2] [9 -1] [6 3] [-8 -3] [1 -1] [4 3] [7 2] [5 2] [-2 3]
[-4 3] [ 4 -3] [6 -1] [-9 2] [-3 1] [7 1] [-2 -3] [-9 1]
[1 -2] [10 -2] [8 -2] [8 -3] [-6 -1] [-8 2] [-5 1] [-5 -1] [7 -3] [9 -3] [9 1]
[-1 -1] [0 3] [2 2] [-4 2] [-4 -3] [-7 -2] [-7 3] [-1 1]
[2 3] [2 -3] [2 -2] [2 -1] [10 -3] [3 3] [9 -2] [-7 -3] [10 1] [-3 3] [-3 -2] [4
1] [5 -1] [5 -3] [-1 2] [9 -1] [0 -2] [-1 -3] [6 -3] [5 3] [8 1]
[8 -1] [-5 3] [-6 -2] [-6 -3] [-8 1] [0 -1] [1 3] [5 1] [4 2] [4 -2] [-7 1] [0

```

```

1] [4 -1] [1 2] [-3 2] [-2 1] [-2 -1] [-9 3] [-9 -3] [1 -3]
   [5 -2] [10 2] [6 1] [6 2] [3 2] [6 -2] [-4 -2] [-3 -1] [-1 3] [8 2] [-7 -1] [-8
-2] [-4 -1] [-4 1] [-5 2] [-7 2] [-1 -2] [-3 -3] [-9 -2] [7 3] [-9 -1]]

```

```

set koordinater-wma [[10 3] [10 -3] [9 3] [9 -3] [8 3] [8 -3] [7 3] [7 -3] [6 3]
[6 -3] [5 3] [5 -3] [4 3] [4 -3] [3 3] [3 -3] [2 3] [2 -3] [1 3] [1 -3]
   [0 3] [0 -3] [-1 3] [-1 -3] [-2 3] [-2 -3] [-3 3] [-3 -3] [-4 3] [-4 -3] [-5 3]
[-5 -3] [-6 3] [-6 -3] [-7 3] [-7 -3] [-8 3] [-8 -3] [-9 3] [-9 -3]
   [10 2] [10 -2] [9 2] [9 -2] [8 2] [8 -2] [7 2] [7 -2] [6 2] [6 -2] [5 2] [5 -2]
[4 2] [4 -2] [3 2] [3 -2] [2 2] [2 -2] [1 2] [1 -2]
   [0 2] [0 -2] [-1 2] [-1 -2] [-2 2] [-2 -2] [-3 2] [-3 -2] [-4 2] [-4 -2] [-5 2]
[-5 -2] [-6 2] [-6 -2] [-7 2] [-7 -2] [-8 2] [-8 -2] [-9 2] [-9 -2]
   [10 1] [10 -1] [9 1] [9 -1] [8 1] [8 -1] [7 1] [7 -1] [6 1] [6 -1] [5 1] [5 -1]
[4 1] [4 -1] [3 1] [3 -1] [2 1] [2 -1] [1 1] [1 -1]
   [0 1] [0 -1] [-1 1] [-1 -1] [-2 1] [-2 -1] [-3 1] [-3 -1] [-4 1] [-4 -1] [-5 1]
[-5 -1] [-6 1] [-6 -1] [-7 1] [-7 -1] [-8 1] [-8 -1] [-9 1] [-9 -1]]

```

```

set koordinater-reverse-pyramid [[10 3] [10 -3] [9 3] [9 -3] [8 3] [8 -3] [7 3] [7
-3] [6 3] [6 -3] [5 3] [5 -3] [4 3] [4 -3] [3 3] [3 -3] [2 3] [2 -3] [1 3] [1 -3]
   [0 3] [0 -3] [-9 3] [-9 -3] [10 2] [10 -2] [9 2] [9 -2] [8 2] [8 -2] [7 2] [7
-2] [6 2] [6 -2] [5 2] [5 -2] [4 2] [4 -2]
   [3 2] [3 -2] [-8 3] [-8 -3] [-7 3] [-7 -3] [-6 3] [-6 -3] [-5 3] [-5 -3] [-4 3]
[4 -3] [-3 3] [-3 -3] [2 2] [2 -2] [1 2] [1 -2] [0 2] [0 -2]
   [-9 2] [-9 -2] [-8 2] [-8 -2] [-7 2] [-7 -2] [-6 2] [-6 -2] [-5 2] [-5 -2] [-4
2] [-4 -2] [-2 3] [-2 -3] [-1 3] [-1 -3] [-3 2] [-3 -2]
   [-2 2] [-2 -2] [-1 2] [-1 -2] [10 1] [10 -1] [9 1] [9 -1] [8 1] [8 -1] [7 1] [7
-1] [6 1] [6 -1] [5 1] [5 -1] [4 1] [4 -1] [3 1] [3 -1] [2 1] [2 -1] [1 1] [1 -1]
   [0 1] [0 -1] [-1 1] [-1 -1] [-2 1] [-2 -1] [-3 1] [-3 -1] [-4 1] [-4 -1] [-5 1]
[-5 -1] [-6 1] [-6 -1] [-7 1] [-7 -1] [-8 1] [-8 -1] [-9 1] [-9 -1]]

```

```

set koordinater-back-to-front [[10 3] [10 -2] [10 2] [10 -1] [10 -3] [10 1] [9 -3]
[9 2] [9 3] [9 -1] [9 1] [9 -2] [8 1] [8 -3] [8 3] [8 -2] [8 -1] [8 2] [7 2] [7 1]
   [7 -3] [7 -2] [7 3] [7 -1] [6 -1] [6 -3] [6 3] [6 -2] [6 1] [6 2] [5 -2] [5 -1]
[5 3] [5 2] [5 1] [5 -3] [4 1] [4 -3] [4 2] [4 3]
   [4 -2] [4 -1] [3 2] [3 -1] [3 -3] [3 3] [3 -2] [3 1] [2 3] [2 -3] [2 1] [2 -2]
[2 2] [2 -1] [1 1] [1 -1] [1 2] [1 -2] [1 3] [1 -3] [0 2] [0 -3] [0 3] [0 -2] [0 -1]
[0 1]
   [-1 2] [-1 -3] [-1 -2] [-1 1] [-1 3] [-1 -1] [-2 -3] [-2 1] [-2 2] [-2 -2] [-2
3] [-2 -1] [-3 3] [-3 1] [-3 -3] [-3 -1] [-3 2] [-3 -2] [-4 -1] [-4 1]
   [-4 3] [-4 -2] [-4 -3] [-4 2] [-5 -2] [-5 -1] [-5 -3] [-5 1] [-5 2] [-5 3] [-6
-3] [-6 3] [-6 -2] [-6 -1] [-6 1] [-6 2] [-7 3] [-7 -3] [-7 1] [-7 -2]
   [-7 2] [-7 -1] [-8 3] [-8 -1] [-8 1] [-8 2] [-8 -3] [-8 -2] [-9 -1] [-9 -3] [-9
2] [-9 -2] [-9 1] [-9 3]]

```

```

set koordinater-steffen [[10 3] [10 -3] [8 3] [8 -3] [6 3] [6 -3] [4 3] [4 -3] [2
3] [2 -3] [0 3] [0 -3] [-2 3] [-2 -3] [-4 3] [-4 -3] [-6 3] [-6 -3] [-8 3] [-8 -3]
   [9 3] [9 -3] [7 3] [7 -3] [5 3] [5 -3] [3 3] [3 -3] [1 3] [1 -3] [-1 3] [-1 -3]
[-3 3] [-3 -3] [-5 3] [-5 -3] [-7 3] [-7 -3] [-9 3] [-9 -3]
   [10 2] [10 -2] [8 2] [8 -2] [6 2] [6 -2] [4 2] [4 -2] [2 2] [2 -2] [0 2] [0 -2]
[-2 2] [-2 -2] [-4 2] [-4 -2] [-6 2] [-6 -2] [-8 2] [-8 -2]
   [9 2] [9 -2] [7 2] [7 -2] [5 2] [5 -2] [3 2] [3 -2] [1 2] [1 -2] [-1 2] [-1 -2]
[-3 2] [-3 -2] [-5 2] [-5 -2] [-7 2] [-7 -2] [-9 2] [-9 -2]]

```

```

[10 1] [10 -1] [8 1] [8 -1] [6 1] [6 -1] [4 1] [4 -1] [2 1] [2 -1] [0 1] [0 -1]
[-2 1] [-2 -1] [-4 1] [-4 -1] [-6 1] [-6 -1] [-8 1] [-8 -1]
[9 1] [9 -1] [7 1] [7 -1] [5 1] [5 -1] [3 1] [3 -1] [1 1] [1 -1] [-1 1] [-1 -1]
[-3 1] [-3 -1] [-5 1] [-5 -1] [-7 1] [-7 -1] [-9 1] [-9 -1]]

```

```

ask passagerer [
  set shape "person"
  set bagage-status false
  set bagagemængde 0
  set bagage-loadetid 0
]

```

```

set temp (round(antal-passagerer * (andel-følger-ikke-regler / 200))) + (round
((med-bagage / 100) * antal-passagerer))
if temp > 120 [set temp 120]
set temp n-values temp [ i -> i ]
set temp shuffle temp
if not empty? temp[
  if (round((med-bagage / 100) * antal-passagerer)) > 0 [
    set temp sublist temp 1 (round((med-bagage / 100) * antal-passagerer))
    foreach temp[
      [i] -> ask passager (i) [
        ifelse random-float 1 < (andel-med-to-tasker / 100)[
          set bagagemængde 2
          set shape "person"
        ][
          set bagagemængde 1
          set shape "person"
        ]
        set bagage-status true
        set bagage-loadetid -1
      ]
    ]
  ]
]
]

```

```

if antal-passagerer != 120 [
  let r 120 - antal-passagerer
  while[r > 0] [
    let index random-in-range 0 (length(sæde-allokering) - 1)
    set sæde-allokering remove-item index sæde-allokering
    set r r - 1
  ]
]

; passagerer som ikke følger reglerne
let antal-følger-ikke-regler round(antal-passagerer * (andel-følger-ikke-regler /
100))
if antal-følger-ikke-regler > 0 [
  ;;valg fra den rigtige rækkefølge
  let list-of-sæde [[0 0]]
  let temp-sæde-allokering sæde-allokering
  while[antal-følger-ikke-regler > 0][

```

```

    let r-num random-in-range 0 (length(temp-sæde-allokering) - 1)
    let random-sæde item r-num temp-sæde-allokering
    set list-of-sæde sentence list-of-sæde (list random-sæde)
    set temp-sæde-allokering remove-item r-num temp-sæde-allokering
    set antal-følger-ikke-regler antal-følger-ikke-regler - 1
  ]
  set list-of-sæde remove-item 0 list-of-sæde

  ;;tilfældig sættes de tilbage i den rigtige rækkefølge
  set antal-følger-ikke-regler round(antal-passagerer * (andel-følger-ikke-regler
/ 100))

  while[antal-følger-ikke-regler > 0][
    let r-num random-in-range 0 (length(temp-sæde-allokering) - 1)
    let random-sæde item (antal-følger-ikke-regler - 1) list-of-sæde

    set temp-sæde-allokering insert-item r-num temp-sæde-allokering random-sæde
    set antal-følger-ikke-regler antal-følger-ikke-regler - 1
  ]
  set sæde-allokering temp-sæde-allokering
]
end

; Passageres bevægelse
to occupy-sæder
  ; Hvis en passager har nået sit sæde?
  ifelse xcor != gotoX [
    ; Hvis en passagerer ikke har nået sit sæde endnu
    if not any? passagerer-on patch-ahead 1 [
      fd 1
    ]
  ]
  [
    ; Når personen endeligt har nået til sit sæde
    facexy gotoX gotoY

    ; En ny ventetæller for personer med en eller to tasker
    if baggage-loadetid = -1 [
      set shape "person"
      set baggage-loadetid (([bagage-på-bagagehylde] of patch-ahead 1) +
bagagemængde) * gnm-loadetid * bagagemængde / 2
    ]
    ; Starter tælleren, hvis tæller ikke er lig med 0, så må passagerne fortsat
vente
    ifelse baggage-loadetid > 0 [
      set baggage-loadetid (baggage-loadetid - 1)
    ]
    [
      ; Passageren har ikke mere bagage og prøver at sætte sig nu

      ; Opdatere mængde af taske på bagagehylde
      set temp bagagemængde ;temp variabel til at samle en patch (bagage) variabel
og person variabel
      ask patch-ahead 1 [

        set baggage-på-bagagehylde (bagage-på-bagagehylde + temp)
      ]
    ]
  ]

```

```

set temp 0

check-bagage
ifelse ycor != gotoY [
  if not any? passagerer-on patch-ahead 1 and vent-sæde-optaget = 0
  [;Sætter tæller for at en passagerer kan komme til deres sæde
    set vent-sæde-optaget tid-til-korrekt-sæde
    set size 0.8
  ]
  ifelse vent-sæde-optaget < 0
  [fd 1
    set vent-sæde-optaget 0]
  [set vent-sæde-optaget vent-sæde-optaget - 1.001]
]
[
  ; Passager når til sit sæde
  set color red
  set shape "person"
  set size 1
  stop
]
]
end

; Hvis personen har bagage skal det placeres på bagagehylden
to check-bagage
  if baggage-status[
    set baggage-status false
    set counter counter + 1
    ; bagage-plads gotoX gotoY
    set shape "person"
  ]
end

to-report random-in-range [low high]
  report low + random (high - low + 1)
end

```