RAPPORT

OPVent 2

Et ELFORSKPROJEKT 349-035

ELFORSK

Kortlægning af luft- samt energiforbrug og bakteriologiske forhold på operationsstuer med laminar- og turbulent airflow ventilation ved indsættelse af kunstig hofte og knæ

Deltagere i udvikling af rapporten

Odense Universitetshospital & Københavns Universitetshospital, Bispebjerg

Søren Overgaard, professor, overlæge, dr.med., forskningsleder
Ortopædkirurgisk afdeling samt SDU og KU

SE Rådgivning A/S med Niras A/S som underleverandør

Projektleder Johnny Nielsen, maskinmester, merkonom i ledelse
Thorbjørn Anstensrud, senior energi- og procesingeniør,
BSc. Mech. Eng.
Jørgen Due Thomsen, afdelingsleder, Norlys

Statens Serum Institut

Elsebeth Tvenstrup Jensen, overlæge,
Central Enhed for Infektionshygiejne

JRV A/S

Daniel Rasmussen, ingeniør, smed og CEO

Odense Universitetshospital

Hanne Lundgaard og Hanne Højvang, hygiejnesygeplejersker
Klinisk Mikrobiologisk afdeling

Syddansk Universitet, Sundhedsvidenskabelige Fakultet

Mia Jan La Mia Malekzadeh, stud.med.
Rikke Juhl Knudsen, stud.med.
Stinna Michelle Nygaard Knudsen, stud.med.

September 2021

Taksigelser

Der skal lyde en stor tak til alle de afdelinger, som har deltaget i projektet. Det gælder både de tekniske og ortopædkirurgiske afdelinger på hospitalerne anført nedenfor. Uden den store velvilje og åbenhed kunne dette projekt ikke være gennemført. Afdelingerne er fremstillet anonymiseret med et bogstav.

Region Nordjylland
- Farsø
- Frederikshavn

Region Midtjylland
- Århus Universitetshospital
- Holstebro

Region Syddanmark
- Vejle
- OUH Odense
- OUH Svendborg
- Grindsted
- Esbjerg
- Sønderborg

Region Sjælland
- Nykøbing Falster
- Næstved

Region Hovedstaden
- Hvidovre
- Hillerød
- Gentofte

Samtidig vil vi gerne takke ELFORSK for støtten til dette projekt.

De skiftende projektadministratorer takkes for en god styring af projektet: Johnny Nielsen, Henrik Ager, Jørgen Due Thomsen.

Bygningsdrift og Service, Odense Universitetshospital takkes for leverance af specialfremstilling af holder til agarplader.

Projektdeltagere

Følgende organisationer og personer har været del af projektet:

SE Rådgivning A/S - Norlys A/S

SE Rådgivning A/S er et datterselskab under Energiselskabet Norlys.
SE Rådgivning har ydet energirådgivning siden 1990 indenfor blandt andet erhverv, offentlige og private kunder.
SE Rådgivning har tidligere deltaget i ELFORSK projekter, både som projektansvarlig og som rådgiver. I 2019 blev SE Rådgivning A/S's rådgivningsaktiviteter solgt til Niras A/S, og både Johnny Nielsen og Thorbjørn Anstensrud fortsatte det videre projektarbejde under Niras A/S.

Projektleder Johnny Nielsen, maskinmester, merkonom i ledelse

Projektleder Johnny Nielsen (JN) har arbejdet med Sygehus ventilation siden 2009.
JN er uddannet maskinmester med 30 års erfaring, heraf har han de sidste 25 år beskæftiget sig med energimæssige opgaver.
Han har været ansat som energirådgiver både ved Østjysk Energi og EnergiMidt i henholdsvis 9 og 5 år. Desuden er JN i dag godkendt energisynskonsulent med nummeret E-36A. JN har derudover været ansat 5 år ved Korn- Og Foderstofkompagniet som energiansvarlig med et årligt energibudget på kr. 100 Mio. Igennem de sidste 3 år som projektleder på ELFORSK projektet OP Vent.

Bidrag til projektet:
JN har sammen med Søren Overgaard været primusmotor på projektet. Han har været hovedskribent på ansøgningen til ELFORSK.

Thorbjørn Anstensrud, senior energi- og procesingeniør, BSc. Mech. Eng.

Thorbjørn Anstensrud (TA) har speciale indenfor energioptimering, især analyse af ventilationsanlæg samt projektering, måling af luftstrømme, trykforhold etc. på ventilationsanlæg. Registreret Energisynskonsulent E-112 B.

Bidrag til projektet: TA har haft kontakt til alle hospitalsafdelinger både på den tekniske og sundhedsfaglige side. Han har gennemført alle opstillinger og målinger, samt beregninger på den tekniske side. TA har desuden været medvejleder på kandidatspecialet under Syddansk Universitet, har deltaget i udarbejdelse af den videnskabelige artikel og er medforfatter herpå. Han har desuden været skribent på den endelige rapport.

Kenneth Buch, ingeniør

Bidrag til projektet: Kenneth Buch har deltaget i projektets udviklingsfase.

Odense Universitetshospital og Syddansk Universitet samt Københavns Universitetshospital, Bispebjerg & Frederiksberg og Københavns Universitet

Søren Overgaard, Professor, overlæge, dr.med., forskningsleder, ortopædkirurgisk afdeling

Søren Overgaard (SO) har stor erfaring med projektforskningsledelse indenfor det ortopædkirurgiske område. Han har et stort netværk både nationalt og internationalt, og er en anerkendt og respekteret forsker. SO har stor erfaring med patientbehandling, specielt

indenfor hofteområdet. Særlig interesse har været infektionsområdet og forebyggelse af infektioner, herunder betydning af ventilation på operationsstuer.

Bidrag til projektet:
SO har sammen med JN været primus motor på projektet. SO har deltaget i alle faser, bortset fra måling på operationsstuerne. Han har desuden været hovedvejleder på kandidatspecialet under Syddansk Universitet og er seniorforfatter på den videnskabelige artikel.

Region Syddanmark

Odense Universitetshospital

Lars Henrik Frich, Overlæge PHD, ortopædkirurgisk afdeling.

Lars Henrik Frich (LHF) er en erfaren ortopædkirurg og forsker med speciale indenfor skulder-kirurgi.

Bidrag til projektet: LHF har deltaget i projektets udviklingsfase.

Michael Kemp, Professor, overlæge, Klinisk Mikrobiologisk afdeling.

Michael Kemp (MK) er ekspert indenfor det mikrobiologisk special og har mange års erfaring indenfor projektledelse og forskning.

Bidrag til projektet: Medansvarlig for design af projektet samt ansvarlig for opsætningen af målinger på agarplader. MK gik ud af projektet per 1. september 2020.

Hanne Lundgaard og Hanne Højvang, hygiejne sygeplejersker Klinisk Mikrobiologisk afdeling

Hanne Lund og Hanne Højvang har begge stor erfaring med hygiejne forhold på hospitaler og operationsstuer.

Bidrag til projektet: Kvalifikation af målinger på operationsstuerne.

Afd. Bioanalytiker, Jeanette Mikkelsen, Klinisk Mikrobiologisk afdeling

Bidrag til projektet: Opsætning og analyse af agarplader.

SDU

Syddansk Universitet, Sundhedsvidenskabelige Fakultet

Mia Jan La Mia Malekzadeh, Stud. med

Bidrag til projektet: Mia Jan La Mia Malekzadeh har deltaget i projekt-planlægningen med opstilling og målinger på operationsstuerne samt i gennemførelse af alle målinger på hospitalsafdelingerne i samarbejde med Thorbjørn Anstensrud.

Rikke Juhl Knudsen, Stud. Med. og Stinna Michelle Nygaard Knudsen, Stud. Med.

Bidrag til projektet: Har gennemført deres kandidatspeciale under Syddansk Universitet og er førsteforfattere på den videnskabelige artikel. De har begge været med til at skrive manuskriptet og har udført beregninger på data, inklusiv statistiske analyser.

Statens Serum Institut
Elsebeth Tvenstrup Jensen, overlæge
Elsebeth Tvenstrup Jensen (ETJ) er overlæge i Central Enhed for Infektionshygiejne. Tovholder på flere af CEI's nationale retningslinjer, bl.a. Nationale Infektionshygiejniske Retningslinjer for nybygning og renovering i sundhedssektoren. Deltaget i udarbejdelsen af FSD/FSTA-kompendiet "Ventilation i rum med invasive indgreb, herunder OP-stuer" (2014).

Bidrag til projektet: ETJ har deltaget i projekt-planlægningen samt kvalificeret opstillingerne og målinger på operationsstuerne. Hun har desuden været medvejleder på kandidatspecialet under Syddansk Universitet, har deltaget i udarbejdelse af den videnskabelige artikel og er medforfatter herpå. Hun har desuden været skribent på den endelige rapport.

JRV A/S
Daniel Rasmussen, ingeniør, smed og CEO
Daniel Rasmussen (DR) har igennem sit virke, i det familieejet firma JRV A/S, stor erfaring med bygning af ventilationsløsninger, der bygger på den nyeste teknologi.
DR og JRV A/S har stor erfaring med konstruktion af ventilation på operationsstuer samt design, renrums teknik og teknisk drift af operationsstuer, herunder validering af disse.

Bidrag til projektet: DR har deltaget i projektplanlægningen, med sin tekniske viden samt kvalificeret opstillingerne omkring målinger på operationsstuerne. Han har desuden været skribent på den endelige rapport.

Sygehus Sønderjylland
Poul Ertzinger, Teknisk Servicechef
Sygehus Sønderjylland har stor erfaring med ventilation på operationsstuer, og de bidrager med brugererfaringer samt stor viden indenfor hygiejne og teknisk drift af operationsstuer samt bygning af nye operationsstuer.

Bidrag til projektet: Poul Ertzinger har deltaget i projektets udviklingsfase.

Aalborg Universitetshospital
Kaj Hyldgaard, Teknisk koordinator.
Aalborg Universitetshospital og Kaj Hyldgaard (KH) har stor erfaring med ventilation på operationsstuer og bidrager med brugererfaringer samt stor viden indenfor hygiejne og teknisk drift af operationsstuer. KH er projektets kontaktperson til Foreningen for Sygehus Maskinmestre.

Bidrag til projektet: KH har deltaget i projektets udviklingsfase.

Formidling af projektet

Foredrag

Foredrag på den største europæisk kongres for ortopædkirurger: EFORT (European Federation of National Associations of Orthopaedics and Traumatology): Home - Virtual EFORT Congress 2021 - EFORT
Laminar Airflow Decreases Microbial Air Contamination Compared with Turbulent Ventilated Operating Theatres During Live Total Joint Arthroplasty – A Nationwide Survey
Rikke Juhl Knudsen*, Stinna Michelle Nygaard Knudsen*, Tine Nymark[1], Thorbjørn Anstensrud[2], Elsebeth Tvenstrup Jensen[3], Mia Jan La Mia Malekzadeh[4], Søren Overgaard[1]

Videnskabelige publikationer

Kandidatspeciale ved Sundhedsvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet 2021

Rikke Juhl Knudsen and Stinna Michelle Nygaard Knudsen
Increased Microbial Air Contamination in Turbulent Airflow Ventilated Operating Theatres Compared to Laminar Airflow During Live Total Joint Arthroplasty – A Nationwide Survey
Main supervisor: Søren Overgaard, Professor
Co-supervisors: Tine Nymark, Clinical Associate Professor, Thorbjørn Anstensrud, Senior Energy and Process Engineer, and Elsebeth Tvenstrup Jensen.

Videnskabelig artikel i anerkendt internationalt tidsskrift:

J Hosp Infect. 2021 Apr 28; S0195-6701(21)00170-5. doi: 10.1016/j.jhin.2021.04.019.
Laminar Airflow Decreases Microbial Air Contamination Compared with Turbulent Ventilated Operating Theatres During Live Total Joint Arthroplasty – A Nationwide Survey
Rikke Juhl Knudsen*, Stinna Michelle Nygaard Knudsen*, Tine Nymark[1], Thorbjørn Anstensrud[2], Elsebeth Tvenstrup Jensen[3], Mia Jan La Mia Malekzadeh[4], Søren Overgaard[1]

Projektet vil blive formidlet til

Maskinmesterforeningen
Hospital Drift & Arkitektur
DANVAK-HVAC
Ingeniøren
Dansk Energi
Danske Regioner
Dagens Medici
EL-FORSK

Rapporten sendes til:

SST, Danske Regioner, Dansk Industris sundhedsudvalg
Sundhedsministeriet
Sygehusdirektørkredsen
Alle Sygehusledelser
Afdelingsledelserne og maskinmestre for deltagende afdelinger/hospitaler
Videnskabelige og faglige selskaber: Dansk Ortopædisk Selskab, Dansk Selskab for Klinisk Mikrobiologi, Fagligt Selskab for Hygiejnesygeplejersker, Dansk Selskab for Centralsterilisering og Sygehushygiejne

Indhold

1 Projekt organisation: OPVent 2 14

2 Forkortelser og forklaringer 15

3 Executive summary 18

Executive summary - English 22

4 Baggrunden for projektet 26

4.1 Den sundhedsfaglige problemstilling 26
4.2 Energimæssig problemstilling 29
4.3 Motivation for projektet 36

5 Formål med OPVent 2 projektet 37

6 Studie design 38

7 Principper og opbygning af ventilationsanlæg på de inkluderede hospitaler 51

8 Styringsstrategi for de enkelte ventilationsanlæg 53

9 Resultater 62

9.1 Korrelation imellem luftskifte og CFU fordelt på LAF og TAF 64
9.2 CFU'er og adfærd på operationsstuer 68
9.3 Energi 69
9.4 Parametre: Ventilationsmæssige karakteristika for OP-stuerne. 70
9.5 Energiforbruget ved hver operation 75
9.6 Simulering af energiforbrug 79

10 Diskussion 87

10.1 Diskussion af vores fund 87
10.2 Diskussion af CFU, adfærd og ventilationssystem. 88
10.3 Diskussion af energiforbrug. 90
10.4 Diskussion af operationsstuernes driftsstyring, opbygning og efteruddannelsesbehov. 90

11 Omkostninger ved de forskellige operationsstuer: Drift og anlæg 91

11.1 Perspektiver 92
11.2 Fremtidens intelligente OP-stue for oprettelse af god luftkvalitet 93
11.3 Konklusion 93

12 Referencer 94

13 Appendix 98

14 Oversigt bilag 116

15 Bilag 1: Drejebog Feltmålinger 117

15.1 Forsøgsdesign 117
15.2 Koordinering 117
15.3 Forudsætninger 117
15.4 Måleudstyr 118
15.5 Procedurer 121
15.6 Hygiejne 128
15.7 Tekniske målinger 129

16 Bilag 2: Tekniske beregninger- metode, fremgangsmåde. 131

16.1 Metode beregninger 131
16.2 Beregninger 136
16.3 Databehandling input. 138
16.4 Resultat input. Oversigt - Ventilation. 147
16.5 Bakteriologiske del 149
16.6 Energiforbrug årsbasis- Simulering "As is" 150
16.7 Energiforbrug årsbasis- Simulering "Level 1" 155
16.8 Energiforbrug årsbasis - Level 2 158
16.9 Sammenligning resultater TAF/LAF 168
16.10 Betydning antal personer, beklædning på OP-stue. 174

17 Bilag 3. Observationer, betragtninger fra screening- og målingssessionerne 177

17.1 Korrekt valg af filterklasse 177
17.2 Grundig check af funktionstilstand 178
17.3 Rengøring indtag 179
17.4 Korrekt placering af køleflade. 180
17.5 VAV-spjæld. Korrekte trykforhold 181
17.6 Utætheder ved adgangsmuligheder til OP-stue 182
17.7 Fastgørelse af loftsplader i skinnesystem 183
17.8 Filterskift til rette tid og korrekt filter 186
17.9 Register ændringer 188
17.10 Korrekt indbygning af ny kammerventilator 189
17.11 Gulvafløb 191
17.12 Adgangsforhold til OP-stuen 192
17.13 Korrekt trykhierarki 193

18 Bilag 4: Kalibreringscertifikater 194

19 Bilag 5. Checkskema, OP-layouts, observationsskemaer 223

Figuroversigt

Figur 1: Projektorganisation 14
Figur 2: Diagram for statistisk præsentation af data 15
Figur 3: MUDAF (Mobil UDAF) 16
Figur 4: Oversigt over faktorer. 27
Figur 5: De fire vigtige parametre 28
Figur 6: Loft I OP-stue med indblæsningsarmaturer 31
Figur 7: Ventilationsprincip for en TAF-stue. 31
Figur 8: Billede af loft i OP-stue 32
Figur 9: Ventilationsprincip for en LAF-stue. 33
Figur 10: Oversigt over vejledende parametre i relation til infektionsfølsomheden 33
Figur 11: Renrumsklasser i henhold til ISO-standarder. Tabel fra FSTA's vejledning 2014. 34
Figur 12: Tekniske krav til ventilation. 34
Figur 13: Tabel over klassificering og specifikationer af filtertyper. 35
Figur 14: Udvælgelsesproces. 38
Figur 15: Skitse over OP-stue 39
Figur 16: OP-stue med agarplade. 39
Figur 17: Spin Air IUL-5500. 40
Figur 18: Eksempel på et observationsskema 41
Figur 19: I-diagram med vist placering af målepunkter for temperaturloggere 42
Figur 20 : Eksempel på effektoptag ventilatorer i anlæg VE03, Hospital B. 43
Figur 21: Eksempel på checkskemaer til OP-stue. 44
Figur 22: Eksempel på checkskema til OP-stue. 45
Figur 23: Eksempel på checkskema til OP-stue. 46
Figur 24: Skema for registrering af max. effekt på OP-stuen. 46
Figur 25: Skema for luftmængder målt på specifikt anlæg. 47
Figur 26: Skema for måling på specifik OP-stue og beregnede virkningsgrader for ventilatorerne. 48
Figur 27: Skema for styringsprincip. 51
Figur 28: Beskrivelse af OP-stue A's ventilationsmæssige opbygning. 53
Figur 29: Beskrivelse af OP-stue B's ventilationsmæssige opbygning. 54
Figur 30: Beskrivelse af OP-stue C's ventilationsmæssige opbygning. 54
Figur 31: Beskrivelse af OP-stue D's ventilationsmæssige opbygning. 55
Figur 32: Beskrivelse af OP-stue E's ventilationsmæssige opbygning. 55
Figur 33: Beskrivelse af OP-stue F's ventilationsmæssige opbygning. 56
Figur 34: Beskrivelse af OP-stue G's ventilationsmæssige opbygning. 56
Figur 35: Beskrivelse af OP-stue H's ventilationsmæssige opbygning. 57
Figur 36: Beskrivelse af OP-stue I's ventilationsmæssige opbygning. 57
Figur 37: Beskrivelse af OP-stue J og K's ventilationsmæssige opbygning. 58
Figur 38: Beskrivelse af OP-stue L's ventilationsmæssige opbygning. 58
Figur 39: Beskrivelse af OP-stue M's ventilationsmæssige opbygning. 59
Figur 40: Beskrivelse af OP-stue N's ventilationsmæssige opbygning. 59
Figur 41: Beskrivelse af OP-stue O's ventilationsmæssige opbygning. 60
Figur.42: Beskrivelse af OP-stue P's ventilationsmæssige opbygning. 60
Figur.43: Beskrivelse af OP-stue Q's ventilationsmæssige opbygning 61
Figur 44: Box Plot. Forekomst af CFU for alle operationer, TAF og LAF. 62
Figur 45: Tabel 1: Karakteristika af operationsstuerne ift. typen af ventilationssystem 63
Figur 46: Antal luftskifte samt aktive og passive mikrobiologiske målinger. 64
Figur 47: Luftmængde samt aktive, og passive mikrobiologiske målinger. 65
Figur 48: LAF-hastighed og samt aktive og passive mikrobiologiske målinger. 66
Figur 49: Overtryk på OP-stue amt aktive og passive mikrobiologiske målinger. 67

Figur 50: Tabel LAF - Adfærd på operationsstuen. 68
Figur 51: Tabel TAF - Adfærd på operationsstuen. 69
Figur 52: Oversigt registrerede, målte og beregnede data for de respektive hospitaler. 71
Figur 53: Oversigt registrerede, målte og beregnede data for de respektive hospitaler. 72
Figur 54: Box plot Luftskifter 73
Figur 55: Box Plot indblæst luftmængde 73
Figur 56: Box Plot udeluftmængden. 74
Figur 57: As Is. Driftsomkostninger, energi og CO2 emission. 75
Figur 58: Oversigt over årlige driftsomkostninger og per igangværende operationstime på OP-stuerne. 76
Figur 59: Box Plot. Årligt energiforbrug. 77
Figur 60: Box Plot. Årsgennemsnitlig driftsomkostninger. 77
Figur 61:AS Is situation. Gennemsnitsværdier, parametre ved modi "In operation" og Set Back 78
Figur 62: Energiforbrug, driftsomkostninger Level 1 optimeringen. 79
Figur 63: Level 1 optimering. Procentvis forbedring 80
Figur 64: Energiforbrug, driftsomkostninger Level 2 optimeringen. 81
Figur 65: Level 2 optimering. Procentvis forbedring. 82
Figur 66: Progressionen i energiforbruget. 83
Figur 67: Progressionen i energimæssige driftsomkostninger. 84
Figur 68: Diagram for udvikling i det gennemsnitlige energiforbrug og driftsomkostning for LAF- og TAF-stuer. 85
Figur 69: Samlede gennemsnitsværdier As Is til Level 2 for LAF og TAF. 85
Figur 70: Tabel 2 – årlige driftsomkostninger til ventilation pr. operationsstue. 91
Figur.71: TSI 95965 Thermo anemometer 118
Figur 72: TinyTag logger. 118
Figur 73: Kyoritso 6315 119
Figur 74: Spin Air IUL-5500 119
Figur 75: Stav for afbæring på gulv. 119
Figur 76: Agarplade. 120
Figur 77: OP-stue med vist agarplade opstillet på trefod. 120
Figur 78: Eksempel på etiketSted = Hospital. Enten med navn eller anonymiseret med bogstav fra oversigtsskemaet over de udvalgte OP-stuer/hospitaler. 121
Figur 79: Prøveseddel for agarplade til udfyldelse. 122
Figur 80: Prøvekuvert. 122
Figur 81: Skitse over OP-stue. 124
Figur 82: Eksempel for observationsskema. 125
Figur 83: Eksempel på analyseskema for bakteriologiske prøver (se bilag 5 for alle hospitaler). 126
Figur 84: Oversigt over forklaringer på forkortelser. 126
Figur 85: Billede af trefod. 129
Figur 86: Eksempel. Placering målepunkter i ventilationsanlæg. 132
Figur 87: Eksempel. Placering målepunkter i kanalsystem 133
Figur 88: Eksempel på principdiagram og styringsstrategien for den udvalgte OP-stue B. 133
Figur 89: Excel beregningsmodellen for B vist opdelt aht. størrelse. 134
Figur 90: Dataudtræk fra DRY 135
Figur 91: Eksempel på et observationsskema. 138
Figur 92: Temperaturmålinger i Enerlog. Udsnit. 139
Figur 93: Temperaturvirkningsgrad beregnet 139
Figur 94: Luftbalance og temperaturvirkningsgrad. Beregningsprogram 140
Figur 95: Oversigt beregninger temperaturvirkningsgrader. 141
Figur 96: Skema over temperaturmålinger ifm. OP-stuen. 142
Figur 97: Oversigt over varmebelastningen på OP-stuerne. 142
Figur 98: Diagram over gennemsnitsværdier for parametre på OP-stuen. 143

Figur 99: Enerlog udsnit. Udfald udsugningsventilator. 144
Figur 100: Enerlog. Tidsudsnit Set Back periode med udfald ventilator. 144
Figur 101: Skema over effektoptag for ventilatorer i forskellige driftsmodi. 145
Figur 102: Eksempel på skema på målt luftmængder til og fra OP-stuen. 145
Figur 103: Skema med luftmængde-, effekt og trykmålinger. Ventilatorvirkningsgrad. 146
Figur 104: Skema for målte og beregnede værdier 1/2 147
Figur 105: Skema for målte og beregnede værdier 2/2 148
Figur 106: Skema for bakteriologiske målinger for både aktive og passive 1/2. 149
Figur 107: Skema for bakteriologiske målinger for både aktive og passive 2/2. 149
Figur 108: Skema for effektoptag til varme og køl. Operation modus 150
Figur 109: Skema for effektoptag til varme og køl. Set Back, udenfor operations modus 150
Figur 110: Skema opsummering effekt til luftbehandling og til ventilatorer 150
Figur 111: Skema for simuleringer. 151
Figur 112: Satser på el-og fjernvarmepris. Kilde Energistyrelsen. 152
Figur 113: As Is. Driftsomkostninger, energi og CO2 emission. 153
Figur 114: Tabel 1: CO2-emissionsfaktorer. 154
Figur 115: Observationer og optimeringsmuligheder, fejlretning CTS-system. 156
Figur 116: Energiforbrug, driftsomkostninger Level 1 optimeringen. 157
Figur 117: In-/Exfiltrationsberegning. 161
Figur 118: In-/Exfiltrationsberegning. 162
Figur 119: OP-modus. Sænkning overtryk. 163
Figur 120: OP-modus lækagetætning. 164
Figur 121: Opsummering OP-modus 165
Figur 122: Skema med oversigt på beregninger. 166
Figur 123: Parameterændringer til Level 2. 166
Figur 124: Energiforbrug, driftsomkostninger Level 2 optimeringen. 167
Figur 125: Gennemsnitlige værdier for alle LAF og TAF OP-stuer. 168
Figur 126: Diagram for udvikling i det gennemsnitlige energiforbrug og driftsomkostning for LAF- og TAF-stuer. 168
Figur 127: Driftsomkostninger, energi inkl. mikrobiologiske målinger. 169
Figur 128: Driftsomkostninger, energi. 170
Figur 129: Diagram for energiforbrug gennem optimeringsfaserne Level 1 og 2. 171
Figur 130: Diagram for driftsomkostninger – Energi gennem faser Level 1 og 2. 172
Figur 131: Diagram for driftsomkostninger – Energi incl. CFU/m³ målinger. 173
Figur 132: Beregning af nødvendig luftmængde ift. CFU. 174
Figur 133: Skema for 7 personer på OP-stuen. 175
Figur 134: Skema for 5 personer på Op-stuen 175
Figur 135: Udtræk fra oversigt over OP-stuer. 176
Figur 136: Billede af filter 177
Figur 137: Billeder af spjældsektion med fejlvisning åbningsgrad for spjæld. 178
Figur 138: Billede af insektnet i luftindtag. 179
Figur 139: Billede af indblæsningsanlæg med forkert placering køleflade ifm. affugtning 180
Figur 140: Billede af VAV-terminal 181
Figur 141: Billede til højre viser dør ind til OP-stue, billede til venstre viser gennemstiksskabe i OP-stue.. 182
Figur 142: Billeder af loft I OP-stue. 183
Figur 143: Billede af trykekspansionsbeholderen for rørsystemet. 184
Figur 144: Billede af en STAD strengregulerings-/balanceringsventil. 185
Figur 145: Billeder af indtagsfilter 186
Figur 146: Billede af filterpressostat. 186
Figur 147: Energiklasser for filtre. 187
Figur 148: Billede af frakoblet VAV-terminal. 188

Figur 149: Billede af kammerventilator. 189
Figur 150: Korrekt indbygning kammerventilatorer 190
Figur 151: Billede af OP-stue med afløbsplacering og gulvudsug. 191
Figur 152: Billede af OP-stue med skydedør. 192
Figur 153: Kopi af cerfiticate of calibration and testing. 194
Figur 154: Kopi af certificate of calibration and testing 195
Figur 155: Kopi af certificate of calibration and testing 196
Figur 156: Kopi af certificate of calibration and testing 197
Figur 157: Kopi af kalibreringscertifikat Tinytag 198
Figur 158: Kopi af kalibreringscertifikat Tinytag 199
Figur 159: Kopi af kalibreringscertifikat Tinytag 200
Figur 160: Kopi af kalibreringscertifikat Tinytag 201
Figur 161: Kopi af kalibreringscertifikat Tinytag 202
Figur 162: Kopi af kalibreringscertifikat Tinytag 203
Figur 163: Kopi af kalibreringscertifikat Tinytag 204
Figur 164: Kopi af kalibreringscertifikat Tinytag 205
Figur 165: Funktionskalibrering Tinytag. 206
Figur 166: Funktionskalibrering Tinytag. 207
Figur 167: Funktionskalibrering Tinytag. 208
Figur 168: Funktionskalibrering Tinytag. 209
Figur 169: Funktionskalibrering Tinytag. 210
Figur 170: Kalibreringscertifikat IUL SpinAir 211
Figur 171: Kalibreringscertifikat IUL SpinAir 212
Figur 172: Kalibreringscertifikat IUL SpinAir 213
Figur 173: Kalibreringscertifikat IUL SpinAir 214
Figur 174: Kalibreringscertifikat Kyoritsu 215
Figur 175: Kalibreringscertifikat Kyoritsu 216
Figur 176: Kalibreringscertifikat Kyoritsu 217
Figur 177: Kalibreringscertifikat Kyoritsu 218
Figur 178: Kalibreringscertifikat Kyoritsu 219
Figur 179: Kalibreringscertifikat Kyoritsu 220
Figur 180: Kalibreringscertifikat Kyoritsu 221
Figur 181: Kalibreringscertifikat Kyoritsu 222

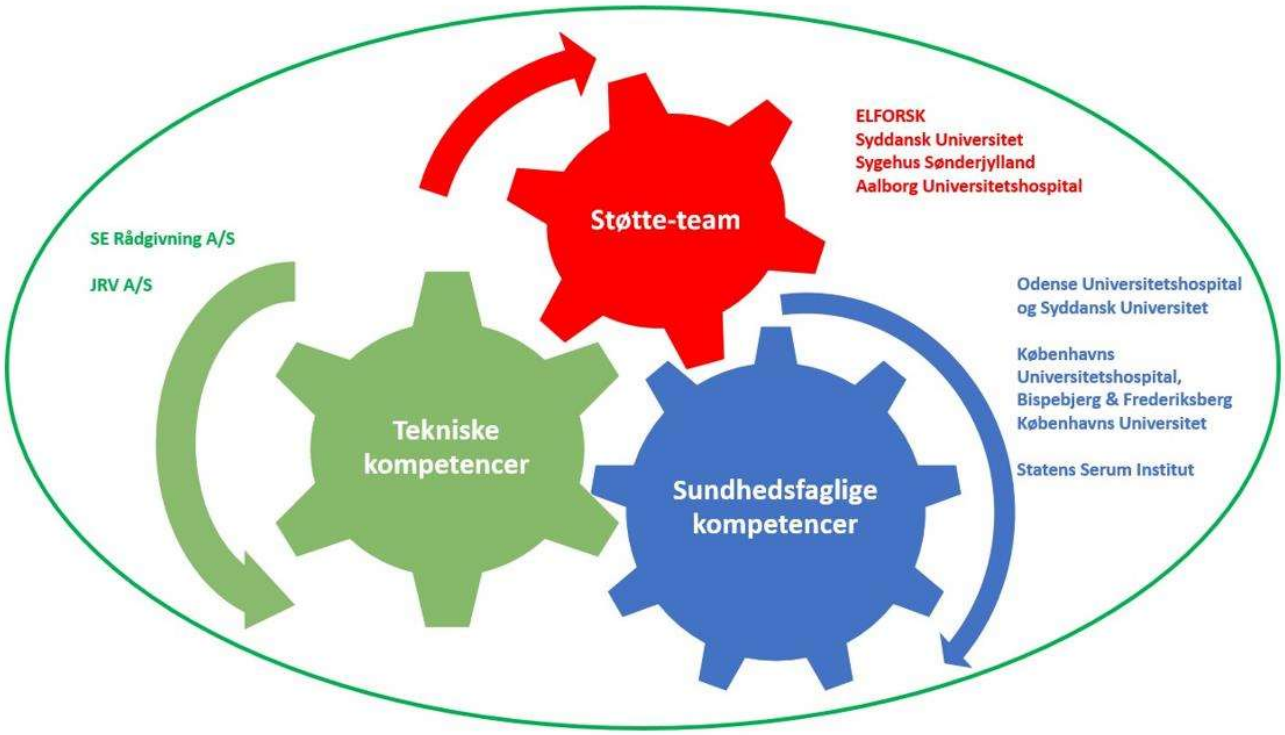
1 Projekt organisation: OPVent 2

Projektgruppen har arbejdet sammen igennem flere år.

Den er sammensat med det formål at komplettere de nødvendige kompetencer, indenfor et såvel teknisk som sundhedsfagligt projekt (Figur).

Til OPVent 2 projektet er den suppleret med kompetencer indenfor myndigheds-regelsæt fra Statens Serum Institut. Yderligere med kompetencer indenfor bygning af nye hospitaler og operationsstuer.

Samtidig har vi har behov for et støtteteam, primært af studenter, til udfærdigelse af målinger, analyser og til sammenskrivning af den videnskabelige artikel. Desuden har der været input fra den tekniske side i forberedelsesfasen.



Figur 1: Projektorganisation

2 Forkortelser og forklaringer

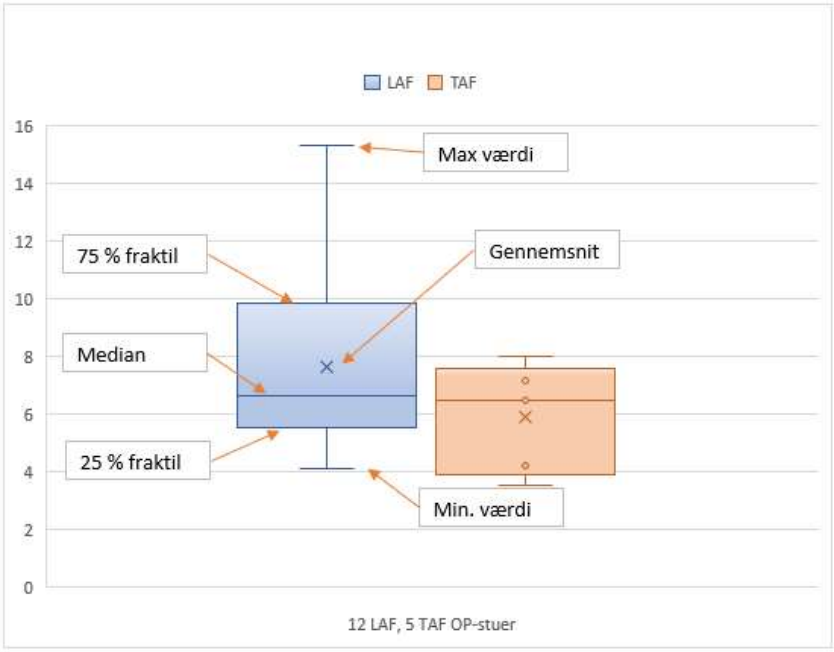
Air sampling (aktiv måling)

Luftprøvetagning for mikrobiologiske partikler vha. pumpe/ventilator. Kontrolleret føres 1 m^3 luft over en, i instrumentet, placeret agarplade. På agarpladen kan der, efter fastlagt dyrkningsperiode, optælles mikrobiologiske kolonier. Enhed CFU/m^3.

Agarplade Agar er en geleagtig substans, ilagt en skål, også kaldet petriskål, der hovedsageligt bliver brugt som fortykningsmiddel og som dyrkningsmedie i mikrobiologisk arbejde

At rest Driftskondition hvor renrummet, her Op-stuen, er i en driftsmæssig tilstand omkring luftmængder, temperatur, relativ fugtighed, som der ville være medicinsk aktivitet, men uden personale er til stede.

Box Plot. Anvendes diagrammæssigt for statistisk præsentation af data. Se nedenfor.



Figur 2: Diagram for statistisk præsentation af data

CFU (Colony forming unit)

Enhed der anvendes indenfor mikrobiologi. Benyttes ved bestemmelse af antal mikroorganismer oftest værende bakterier.

CTS Central tilstandskontrol og styring. Automatik hvor ønskede set punkter, omkring rumtemperatur, luftmængder, tryk, driftstidspunkter etc., kan sættes og som et evt. ventilationsanlæg reguleres efter.

FSTA Forum for Sygehus Teknik og Arkitektur er en forening, der blev stiftet den 16. marts 2011 af en gruppe af initiativtagere med faglig og mangeårig interesse indenfor det danske sundheds- og hospitalsvæsen. https://fsta.dk

HEPA High efficiency particulate absorbing filter der anvendes I ventilationssystemerne.

LAF Laminar airflow. Forefindes i horisontal og vertikal udgave. Vertikal er den oftest forekommende.

Luftskifte (g/h)
Luftskiftet er antallet gange i timen, som luften i rummet udskiftes vha. den indblæste luftmængde typisk fra ventilationsanlægget. Enhed (g/h).



Figur 3: MUDAF (Mobil UDAF)

MUDAF Mobile Uni directional Air Flow. Mobil UDAF vist ovenfor.

NIR Nationale Infektionshygiejniske Retningslinjer [1]. NIR er udarbejdet af Central Enhed for Infektionshygiejne (CEI), Statens Serum Institut i samarbejde med de lokale infektionshygiejniske enheder (IHE) samt andre relevante faglige specialister og interessenter på området. Retningslinjerne har sit afsæt i infektionshygiejne, patientsikkerhed og kvalitetssikring og er tilpasset danske forhold.

OP Operation.

Overtryk Forskellen i tryk mellem to rum. I dette projekt er det trykforskellen mellem OP-stuen og typisk OP-gangen, som er trykreferencen.

Passiv luftprøvetagning
Sedimentation, nedfald af mikrobiologiske partikler på agarplader, eksponeres for nedfald i et registreret tidsrum. Dyrkning og optælling af mikrobiologiske kolonier. Enhed CFU/m²/h.

PJI Fra engelsk; prosthetic joint infection, hvilket vil sige betændelse omkring en indsat kunstig hofte eller et kunstigt knæ.

PI diagram Piping and instrumentation diagram.

SB (Setback funktion)
En driftskondition hvor ventilationssystemet drifter med nedsat kapacitet på luftmængden, køl og evt. affugtning, for at reducere de energimæssige driftsomkostninger med sikring af et overtryk. Driftskondition er kun I brug, når der ikke er medicinsk aktivitet på Op-stuen.

SSI	Surgical site infection – Herved forstås både overfladiske infektion i selve operationssåret og dybe infektioner omkring f.eks. kunstige hofte/knæ eller et organ i bughulen. Den inkluderer altså begrebet PJI (forklaret).
TAF	Turbulent airflow. Tilførsel af luft til Op-stuen, hvor den indblæste luft opblandes med rumluften vha. induktion.
TV	Turbulent ventilation. Det som bruges ved TAF OP-stuer.
UDAF	Uni directional Air Flow er det samme som LAF.

3 Executive summary

OPVent 2 projektet er initieret i 2017 og afsluttet i sensommeren 2021. Projektet ligger i logisk forlængelse af OP Vent 1 projektet og er karakteriseret ved studier ved faktiske forhold under kirurgiske operationer.

OPVent 2 projektets sigte er at undersøge de to typisk anvendte ventilationssystemer, LAF og TAF, på operationsstuer på Danmarks hospitaler.

Projektet har afdækket energiforbruget ved knæ- og hofteoperationer, samt mulighederne for reduktion af dette. Desuden har vi målt luftens kvalitet på LAF- og TAF-stuerne, og om den er overholdt iht. de gældende krav og anbefalinger.

Projektets resultater giver en overordnet værdi ved at anvise energibesparelser og reduktion af kontamineringsrisikoen ved operationer.

Projektet afdækker bredt gennem analyse af en række parametre, der er opsamlet i forbindelse ved 51 gennemførte knæ- og hofteoperationer på 15 danske hospitaler.

Projektet har været bemandet med højt kvalificerede specialiserede ressourcer, som har afsæt i en praksisnær hverdag, der primært spænder over de lægefaglige, energitekniske og ventilationskonstruktionsmæssige felter.

Projektets resultater er opsøgende formidlet gennem foredrag, videnskabelige publikationer og direkte til myndigheder, organisationer og erhvervsliv.

Energimæssig problemstilling

Da sundhedssektoren er en af de store udledere af drivhusgasser, griber OPVent 2 ind i den globale udfordring med stigende temperatur og afledt heraf målene i "Pariseraftalen 2015" med reduktion af drivhusgasser [2]. Nationalt omfavnes således de mere konkrete mål, om at sænke udledningen af drivhusgasser med 55 procent frem til 2030 og at sænke CO2-udledningen med 39% i forhold til niveauet i 2005 [3].

Større offentlige bygninger tegner sig for en væsentlig andel af Danmarks samlede energiforbrug. Særligt er sygehuse en energikrævende bygningstype, som udgør 90 % af regionernes samlede energiforbrug. Særligt ventilation er en energikrævende bygningsinstallation, som udgør 20 % af sygehuses elforbrug.

Der findes en række forskellige typer af ventilationsanlæg til operationsstuer på sygehuse, som hver især tjener forskellige formål. Fælles for dem er at opretholde et atmosfærisk indeklima, som primært har til formål at forhindre bakterie- og partikeltransport, som forøger risikoen for forekomsten af infektioner, og sekundært sikrer arbejdseffektivitet for sygehusets personale og patientkomfort.

Ventilation på operationsstuer er særlig interessant, idet der heri forefindes de mest strikse krav til ventilation og den afledte renhed på operationsstuerne. Det vurderes, at der er et betydeligt energibesparelsespotentiale.

Der er primært to ventilationsprincipper, der benyttes på operationsstuer. Det konventionelle princip, kaldet **TAF** – Turbulent Air Flow, som ventilerer rummet og den laminare, retningsbestemte indblæsning **LAF,** som danner et område omkring operationslejet**.** Derudover findes andre varianter, men projektet forholder sig ikke til disse, da der ikke var operationsstuer, der kunne indgå i projektet.

For begge princippers vedkommende skal der holdes et overtryk for, at kontamineret luft fra omkringliggende rum ikke trænger ind på operationsstuen.

De to ventilationssystemer bliver benyttet under den antagelse, at den indblæste ultrarene filtrerede luft på OP-stuen reducerer risikoen for infektion.

Projektet undersøger de energimæssige aspekter omkring de 2 ventilationsprincipper, herunder besparelsespotentialer som sammenholdes med den sundhedsfaglige problemstilling.

Den sundhedsfaglige problemstilling

Byrden af muskuloskeletale tilstande på verdensplan og i Danmark er stor. Det er blandt top fem med hensyn til omkostninger og en af de hyppigste årsager til sygefravær og relateret tab af produktivitet til økonomien og liv i mange lande. En af de meget udbredte tilstande er hofte- og knæartrose (OA), som i slutkliniske stadier behandles med kunstig hofte eller knæ.

Kunstig hofte og knæ er en af de mest almindelige ortopædiske procedurer i Danmark, og på verdensplan med mere end 20.000 operationer i DK og over 1 million procedurer udført i USA.

Den mest frygtede komplikation efter kunstig hofte- og knæoperation er proteseinfektion (PJI) [4-5]. PJI er forbundet med høj sygelighed, der resulterer i langvarig hospitalsindlæggelse, og det har ødelæggende indvirkning på patienters liv, da det er invaliderende og kan kræve reoperationer med risiko for betydelige bivirkninger [6-8]. Det har en høj økonomisk indvirkning med øgede sundhedsudgifter og dødelighed. Under operationen kan bakterier komme via luften, såkaldte luftbårne infektioner.

Forebyggelse af PJI er af største vigtighed, hvorfor dybtgående kendskab til årsager og påvirkende faktorer er vigtig. Ift. de organisatoriske forhold er ventilation og luftkvaliteten på operationsstuen en af de faktorer, som spiller en betydelig rolle for kontaminering under operationen.

Luftkvaliteten, som bidrager til et godt hygiejnisk niveau, kan ikke stå alene, men en række andre områder, som patientens modtagelighed, beklædning, adfærd, rummets udførelse og udformning, rengøring-, oprensning, desinfektions- og sterilisationsmetoder, er også afgørende [1]. Samtidig er indgrebets karakter af betydning for tilladelige mængder af smittefarlige partikler i rumluften. Projektet tager højde for b.la. grænseværdier for bakteriekoncentrationen på operationsstuer.

Ved at begrænse antallet af partikler reduceres således også antallet af bakterier.

Motivation for projektet

OPVent 2 er en videreførelse af OP-Vent 1 projektet, hvor studiet blev udført som mockup, hvilket vil sige uden patienter, og med anvendelse af en opvarmet dukke og simulerede fuldstændige udførelser af hofteoperationer på reelle operationsstuer.

Studiet viste, at det var muligt at nedsætte ventilationsmængden med 50 %, og det relaterede energiforbrug med ca. 40 %, uden at gå på kompromis med antallet af mikroorganismer (CFU) på operationsstuer med LAF.

Derimod var det ikke muligt at nedsætte ventilationen på operationsstuer med TAF uden stigning i CFU. Samtidig fandtes det på TAF-stuer ved 100 % ventilation, at det er ikke var muligt at opretholde et mikrobiologisk miljø, som overholder de gældende retningslinjer. [9]

Set i lyset af at en række af de nye supersygehuse planlægges med operationsstuer med TAF-stuer, har vi fundet det væsentligt at undersøge energiforbruget og forekomst af mikroorganismer på både LAF- og TAF-stuer under normal hospitalsdrift direkte under rigtige operationer og under samtidig måling af mikroorganismer.

Perspektivet med dette er, at afdække mulighed for at nedsætte energiforbruget igennem bedre styring af ventilationsanlæggene. Udover den mulige store energibesparelse, kan der også være patient- og samfundsmæssige besparelser ved anvendelse af LAF frem for TAF, hvis LAF nedsætter kontamineringsrisikoen.

Formål med OPVent 2 projektet

Projektets overordnede formål er at undersøge forekomst af mikroorganismer på LAF- og TAF-operationsstuer målt under real-life operationer samt beregne energiforbruget. De specifikke formål er

1. at undersøge antallet af CFU'er ved operationer udført på LAF- og TAF-stuer
2. at undersøge betydning af adfærd målt som dør- og gennemstikskabs-åbninger på operationsstuen
3. at måle energiforbruget ved hver operation
4. at beregne mulig besparelse af energiforbrug ved optimering af en række parametre

Projektet er gennemført på 15 hospitalsmatrikler, hvor der er udført 51 knæ- og hofteoperationer, fordelt på operationsstuer med LAF- og TAF-ventilation.

Målinger & adfærd

I forbindelse med operationerne er der gennemført en stor mængde målinger. Energitekniske forhold, som fx tryk, energioptag i installationer og temperaturforhold og de bakteriologiske gennem opsamling og efterfølgende analyse af partikler ved brug af agarplader, er indgået i studiet. Der er anvendt både aktiv og passiv dataopsamling under observation af gældende standarder og anerkendte metoder.

Adfærd hos operationspersonale, antallet af åbninger af døre og gennemstiksskabe, samt antal personer og deres beklædning, blev noteret under operationen og indgår ligeledes i studiet.

Energiforbrug og driftsbesparelser.

Da alle de målte anlæg er forskellige konstrueret, er der fortaget optimeringsberegninger og simuleringer særskilt på alle anlæg.

Der er simuleret forbedringsniveauer for de 15 operationsstuer, der er undersøgt:

Resultatet af beregninger og energisimuleringer viser en energibesparelse i forhold til nuværende situation på 338.000 kWh/år svarende til 366.000 kr./år. CO_2 emission reduceret med 7,5 ton/år. Procentvis besparelse er på 34 % for driftsomkostninger og 31 % på energiforbruget. CO_2 emission reduceres med 23 %.

Energi- og driftsbesparelser, opdelt på LAF og TAF, viser den procentvis største reduktion for LAF-stuerne med en forskel på op til 4 % ned til TAF-stuerne.

Besparelser uden at kompromittere den mikrobiologiske sikkerhed ifm. luftskifte, LAF luftmængder og hastighed etc., som er uændrede under operationen.

På nær driftsomkostning energi i "As is" situationen er LAF-stuer billigst i energimæssig drift med laveste energiforbrug igennem 2 beregnede optimeringsfaser. LAF 28.800 kWh/år kontra TAF på 41.200 kWh/år.

Procentvis energimæssig besparelse er:

LAF: (51.913 – 28.844) /51.913 · 100 % = 44 %

TAF: (59.216 – 41.264) /59.216 · 100 % = 30 %

Mikrobiologiske gennemsnitsværdier for aktiv air sampling samt passiv sedimentation er ligeledes væsentlig lavere for LAF end for TAF-stuerne.

TAF-stuer ligger en faktor 15 højere end LAF-stuerne ved de aktive air sampling målinger og faktor 6 højere ved passiv sedimentation.

Alle LAF-stuer overholdt de gældende krav for luftkvalitet, mens 56 % (9/16) af operationerne på TAF-stuer havde for mange mikroorganismer (CFU'er).

Økonomiske perspektiver

I forbindelse med såvel nyanlæg som renoveringer bør der tages en holistisk økonomiske tilgang.

Det er vigtigt, at man prissætter de 2 systemer - LAF og TAF - ens. Det vil sige, at hvis der i LAF'en er luft- og gasudtag, ekstra lys, eltilslutninger i teknikbroen osv., bør prisen for dette også medtages i TAF-systemet for at kunne sammenholde omkostningerne.

Man skal også forholde sig til luftmængderne, anlægs- og kanalstørrelser, pladsforhold til kanalerne, isolering af kanaler, brandspjæld, styringen osv., da alt dette også har indflydelse på prisdifferencen.

De energimæssige omkostninger skal også inddrages, herunder sikring af driftsovervågning og vedligeholdelse. Der ses betydelige energibesparelser ved at sikre løbende optimal drift af ventilationssystemerne på operationsstuerne, og det uden at sætte den mikrobiologiske sikkerhed på operationsstuen - og dermed patientsikkerheden - over styr.

Studiets konklusion

Vores undersøgelse viste at:

Sundhedsfagligt

- *LAF-ventilerede operationsstuer reducerede CFU-tal sammenlignet med TAF ved live-kirurgi*
- *Alle LAF-stuer tilvejebragte ultraren luft med aktivt CFU-tal under 10 CFU/m^3, mens TAF-stuerne have for høje værdier ved 56% af (9/16) operationer*
- *Personalets adfærd, herunder antal og samlede antal døråbninger, havde ikke indflydelse på CFU-tællinger*
- *Øget fysisk volumen af operationsstuen resulterede i et fald i antal CFU' er*

Teknisk

- *Driftsudgifterne var mindre på LAF-stuen*
- *Simulering viste, at det er muligt at spare op til 50 % af det samlede energiforbrug på operationsstuen*

Overordnet set mener vi, at LAF er væsentligt mere robust end TAF og synes at være svær at komme udenom i den fremtidige hospitalsplanlægning af både patientsikkerheds- og driftsmæssige forhold.

Executive summary - English

The OP Vent 2 project was initiated in 2017 and completed in the late summer of 2021. The project is a logical extension of the OP Vent 1 project and is characterized by studies of actual conditions during surgical operations.

The aim of the OP Vent 2 project is to investigate the two typically used ventilation systems, LAF and TAF, in operating rooms at Danish hospitals.

The project has uncovered the energy consumption of knee and hip surgeries, as well as the possibilities for reducing this. In addition, we have measured the quality of the air in the LAF and TAF rooms, and whether it has been complied with in accordance to the applicable requirements and recommendations.

The results of the project provide an overall value by indicating energy savings and reduction of the risk of contamination during operations.

The project uncovers broadly through analysis of a number of parameters that have been collected in connection with 51 completed knee and hip surgeries at 15 Danish hospitals.

The project has been staffed with highly qualified specialized resources, which are based on a practical everyday life that primarily spans the medical, energy technical and ventilation construction fields.

The results of the project are presented through lectures, scientific publications and directly to authorities, organizations and the business community.

Energy issue

As the healthcare sector is one of the major emitters of greenhouse gases, OP Vent 2 intervenes in the global challenge of rising temperatures and derives from this the goals of the “Paris Agreement 2015” with the reduction of greenhouse gases [2]. Nationally, the more concrete goals of reducing greenhouse gas emissions by 55 percent by 2030 and reducing CO2 emissions by 39% compared to the level in 2005 [3] are thus embraced.

Larger public buildings account for a significant share of Denmark's total energy consumption. In particular hospitals are an energy-intensive type of building, which amounts to 90% of the regions' total energy consumption. Especially ventilation is an energy-intensive building installation, which accounts for 20% of the hospitals' electricity consumption.

There are several different types of ventilation systems for operating rooms in hospitals, each of which serves different purposes. Common to them is to maintain an atmospheric indoor climate, which primarily aims to prevent bacteria and particle transport, which increases the risk of the occurrence of infections, and secondarily ensures work efficiency for hospital staff and patient comfort.

Ventilation in operating rooms is particularly interesting, as it contains the strictest requirements for ventilation and the derived cleanliness of operating rooms. It is estimated that there is a significant energy saving potential.

There are primarily two ventilation principles used in operating rooms. The conventional principle, called **TAF** - Turbulent Air Flow, which ventilates the room and the laminar, directional air injection **LAF,** which forms an area around the operating bed**.** In addition, there are other variants, but the project does not relate to these, as there were no operating rooms that could be included in the project.

For both principles, an overpressure must be maintained to ensure that contaminated air from surrounding rooms does not enter the operating room.

The two ventilation systems are used under the assumption that the blown ultra-clean filtered air in the operating room reduces the risk of infection.

The project investigates the energy aspects around the 2 ventilation principles, including savings potentials which are compared with the healthcare issues.

The healthcare issues

The burden of musculoskeletal conditions worldwide and in Denmark is great. It is among the top five in terms of cost and one of the most common causes of sick leave and related loss of productivity to the economy and life of many countries. One of the very common conditions is hip and knee osteoarthritis (OA), which in end-of-clinical stages is treated with artificial hip or knee.

Artificial hip and knee is one of the most common orthopedic procedures in Denmark and worldwide with more than 20,000 surgeries in DK and over 1 million procedures performed in the United States.

The most feared complication after artificial hip and knee surgery is prosthetic infection (PJI) [4-5]. PJI is associated with high morbidity resulting in prolonged hospitalization and it has devastating effects on patients' lives as it is disabling and may require reoperations with risk of significant side effects [6-8]. It has a high economic impact with increased health care costs and mortality. During the operation, bacteria can come through the air, so-called airborne infections.

Prevention of PJI is of the utmost importance, which is why in-depth knowledge of causes and influencing factors are important. As related to the organizational conditions, ventilation and air quality in the operating room is one of the factors that play a significant role in contamination during the operation.

Air quality, which contributes to a good level of hygiene, cannot stand alone, but a number of other areas, such as patient susceptibility, clothing, behavior, room execution and design, cleaning, purification, disinfection and sterilization methods are also crucial [1]. At the same time, the nature of the intervention is important for permissible amounts of infectious particles in the room air. Among other things the project considers the limit values for the bacterial concentration in operating rooms.

Thus, limiting the number of particles also reduces the number of bacteria.

Motivation for the project

OP Vent 2 is a continuation of the OP-Vent 1 project, where the study was performed as a mockup, i.e., without patients, and with the use of a heated doll and simulated complete performances of hip surgeries in real operating rooms.

The study showed that it was possible to reduce the amount of ventilation by 50%, and the related energy consumption by approx. 40%, without compromising the number of microorganisms (CFU) in operating rooms with LAF.

In contrast, it was not possible to reduce ventilation in operating rooms with TAF without an increase in CFU. At the same time, it was found in TAF rooms at 100% ventilation that it was not possible to maintain a microbiological environment that complied with the applicable guidelines. [9]

Given that several of the new super hospitals are planned with operating rooms with TAF-rooms, we found it important to analyze the energy consumption and the presence of microorganisms in both the LAF and TAF rooms during proper surgeries and during simultaneous measurements of microorganisms.

The perspective with this is to uncover the possibility of reducing energy consumption through better control of the ventilation systems. In addition to the possible large energy savings, there may also be patient and societal savings by using LAF rather than TAF if LAF reduces the risk of contamination.

Purpose of the OP Vent 2 project

The overall aim is to investigate the presence of microorganisms on the LAF - and TAF surgeries measured during real-life operations and to calculate energy usage. The specific purposes are

1. to examine the number of CFUs at surgeries performed in the LAF - and TAF rooms
2. to examine the importance of behavior measured as door- and piercing cabinets - openings in the operating room
3. to measure energy consumption at each surgery
4. to calculate possible savings in energy consumption by optimizing a number of parameters

The project has been carried out at 15 hospital registers, where 51 knee and hip surgeries have been performed in operating rooms with either LAF or TAF ventilation.

Measurements & behavior

In connection with the operations, many measurements have been carried out. Energy technical conditions, such as pressure, energy uptake in installations and temperature conditions and the bacteriological ones through collection and subsequent analysis of particles using agar plates, have been included in the study. Both active and passive data collection have been used while observing current standards and recognized methods.

Behavior of the surgical staff, the number of openings of doors and piercing cabinets, as well as the number of people and their clothing, were noted during the operation and are also included in the study.

Energy consumption and operating savings.

As all the measured plants are constructed differently, optimization calculations and simulations have been performed separately on all plants.

Enhancement levels have been simulated for the 15 operating rooms, which were examined:

The result of calculations and energy simulations shows an energy saving compared to the current situation of 338,000 kWh / year, equivalent to DKK 366,000 / year. CO2 emissions reduced by 7.5 ton / year. Percentage savings are 34% on operating costs and 31% on energy consumption. CO2 emissions are reduced by 23%.

Energy and operating savings, divided into LAF and TAF, show the largest percentage reduction for the LAF rooms with a difference of up to 4% down to the TAF rooms.

Savings without compromising the microbiological safety in connection with air change, LAF air volumes and speed etc., which are unchanged during the operation.

With the exception of operating cost energy in the “As is” situation, LAF rooms are the cheapest in energy operation with the lowest energy consumption through 2 calculated optimization phases. LAF 28,800 kWh / year versus TAF of 41,200 kWh / year.

In percentage terms the energy savings are:

LAF: (51,913 - 28,844) / 51,913 · 100% = 44%

TAF: (59,216 - 41,264) /59,216 · 100% = 30%

Microbiological average values for active air sampling and passive sedimentation are also significantly lower for LAF than for the TAF rooms.

TAF - rooms are a factor of 15 higher than the LAF - rooms in the active air sampling measurements and factor 6 higher in passive sedimentation.

All LAF rooms complied with the existing air quality requirements, while 56% (9/16) of the surgeries at TAF rooms had too many microorganisms (CFUs).

Economic perspectives

In connection with new constructions as well as renovations, a holistic economic approach should be taken.

It is important to price the two systems - LAF and TAF - alike. This means that if there is air and gas outlets, extra lights, electrical connections in the bridge engineering, etc. in the LAF, the price for this is also included in the TAF system to be able to compare the costs.

One must also consider the air volumes, plant and duct sizes, space conditions for the ducts, insulation of ducts, fire dampers, the control, etc., as all this also influences on the price difference.

The energy costs must also be included, including ensuring operational monitoring and maintenance. There is significant energy savings by ensuring continuous optimum operation of the ventilation systems in the operating rooms, and that without compromising the microbiological safety of the room - and thereby patient safety.

Study conclusion

Our study showed that:

Health professional

- *LAF-ventilated operating rooms reduced CFU numbers compared to TAF in live surgery*
- *All LAF rooms provided ultra-clean air with an active CFU number below 10 CFU / m^3 while the TAF rooms had too high values in 56% of (9/16) the surgeries*
- *Staff behavior, including number and total number of opening of doors, did not affect CFU counts*
- *Increased physical volume of the operating room resulted in a decrease in the number of CFUs*

Technical

- *Operating expenses were less in the LAF room*
- *Simulation showed that it is possible to save up to 50% of the total energy consumption in the operating room*

Overall, we believe that LAF is significantly more robust than TAF and seems to be difficult to get around in the future hospital planning of both patient safety and operational conditions.

4 Baggrunden for projektet

4.1 Den sundhedsfaglige problemstilling

Byrden af muskuloskeletale tilstande på verdensplan og i Danmark er stor. Det er blandt top fem, med hensyn til omkostninger, og en af de hyppigste årsager til sygefravær, og relateret tab af produktivitet til økonomien og liv i mange lande [10]. En af de meget udbredte tilstande er hofte- og knæartrose (OA), som i slutkliniske stadier behandles med kunstig hofte eller knæ.

Kunstig hofte og knæ er en af de mest almindelige ortopædiske procedurer i Danmark og på verdensplan med mere end 20.000 operationer i DK, og over 1 million procedurer udført i USA årligt [11]. Begge operationstyper er anerkendt som succesfulde procedurer, der reducerer smerter og øger fysisk aktivitet og livskvalitet. Desuden har operationerne vist sig at være omkostningseffektive sammenlignet med ikke-kirurgiske procedurer [12].

Den mest frygtet komplikation, efter kunstig hofte- og knæoperation, er proteseinfektion (PJI). PJI er forbundet med høj sygelighed, der resulterer i langvarig hospitalsindlæggelse, og det har ødelæggende indvirkning på patienters liv, da det er invaliderende og kan kræve reoperationer med risiko for betydelige bivirkninger. Det har en høj økonomisk indvirkning med øgede sundhedsudgifter og dødelighed [7, 13-15] (Zimmerli et al. 2004, Bozic og Ries 2005, Osmon et al. 2013, Gundtoft et al. 2017). PJI tegner sig for omkring 15-20 % af genoperationsprocedurerne. PJI har er frekvens på ca. 0,5% - 5% afhængig af, hvorledes det opgøres og hvor gode metoder, man har til diagnosticering. I Danmark er der udviklet en valideret algoritme, der simpelt kan fange de fleste PJI ved hjælp af nationale databaser [16-17].

Betegnelserne SSI og PJI og vejen til infektion

SSI er fælles betegnelse for både overfladiske og dybe infektion, mens PJI kun betegner de dybe.
PJI er defineret ved tilstedeværelse af bakterier omkring protesen og er særlig alvorlig, som anført ovenfor.

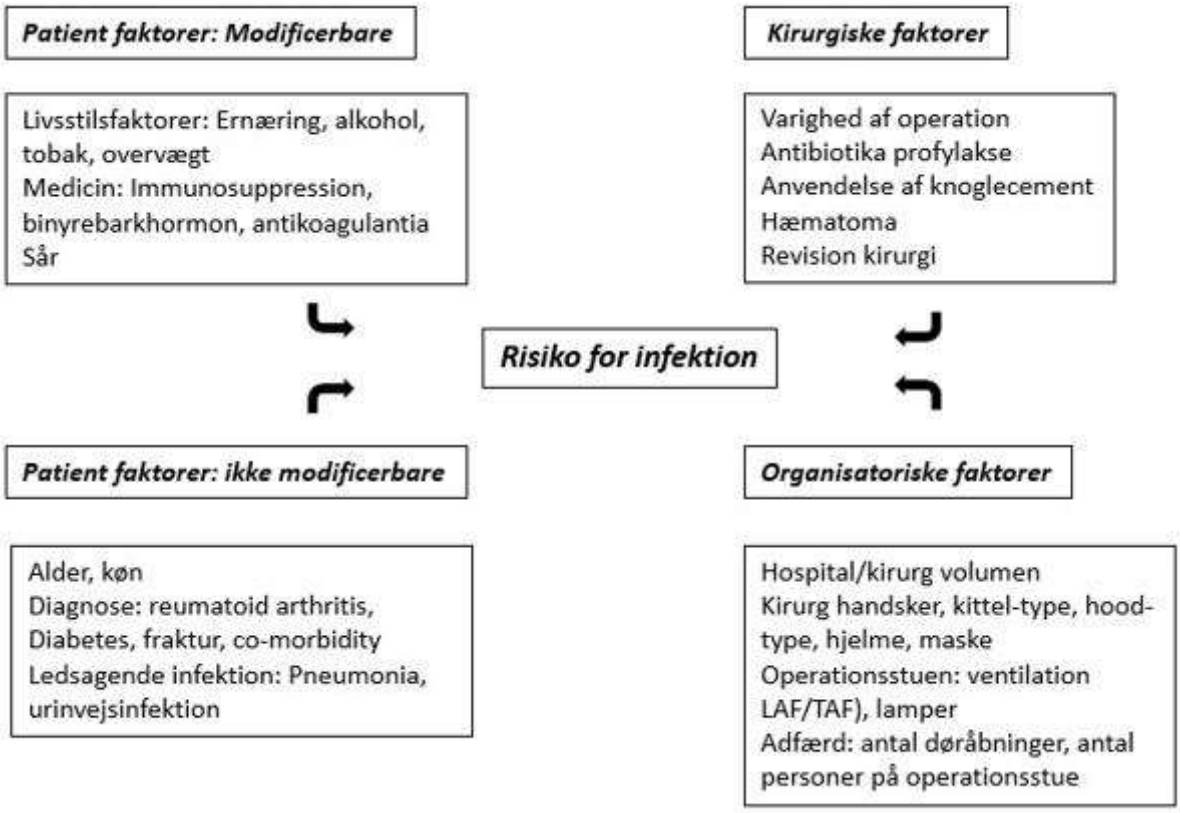
Bakterier kan kommen ind omkring protesen ad flere veje. Under operationen kan bakterier komme via luften, såkaldte luftbårne infektioner. En anden mulighed er fra patientens egne sårkanter, der, trods afspritning før operationen, indeholder bakterier. Efter operationen kan det ske via blodet, som i nogle tilfælde indeholder bakterier, uden at patienten er alvorlig syg. Der er også situationer, hvor patienten har blodforgiftning, hvor bakterier sætter sig i måske flere kunstige led. Det er ofte livstruende.

Forebyggelse af PJI er af største vigtighed, hvorfor dybtgående kendskab til årsager og påvirkende faktorer er vigtig.

Faktorer med betydning for post-operativ infektion

De kan relateres til patienten og være faktorer, der kan modificeres til den kirurgisk procedure og til organisatoriske forhold (Figur 4).

Ift. de organisatoriske forhold er ventilation og luftkvaliteten på operationsstuen en af de faktorer, som spiller en rolle for kontaminering under operationen [4-5].



Figur 4: Oversigt over faktorer.

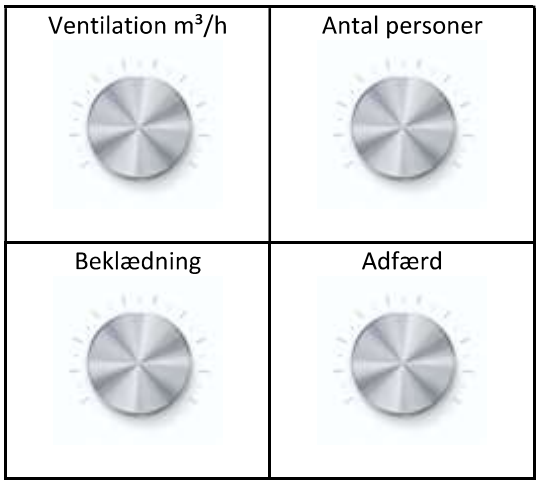
Luftkvalitet på operationsstuer

Risikoen for SSI er blevet diskuteret i mere end et halvt århundrede, herunder betydningen af luftkvaliteten på operationsstuen [4, 18]. Der har ikke været enighed om, hvor stor en rolle den spiller for udvikling af PJI, selvom det kan synes oplagt. Det skyldes, at der er mange faktorer, der spiller en rolle, som anført ovenfor.

Rumluftens renhed kan derfor have afgørende betydning på operationsstuer. Høje bakterie-forekomster kan sandsynligvis forøge risikoen for infektioner efter en operation, samt skabe ubehageligt arbejdsmiljø for personalet på operationsstuen. Derfor skal en operationsstue, i ventilationsmæssig sammenhæng, både ses som et rum, hvor der er høje hygiejnekrav (renrum) i forbindelse med invasive indgreb, og et arbejdsrum med et godt arbejdsmiljø, hvor arbejdstilsynets bestemmelser skal overholdes.

Det er vigtigt at pointere, at luftkvaliteten, som bidrager til godt hygiejnisk niveau, ikke kan stå alene, men områder som patientens modtagelighed, beklædning, adfærd, rummets udførelse og udformning, rengøring-, oprensning, desinfektions- og sterilisationsmetoder også er afgørende. Samtidig er indgrebets karakter betydende for tilladelige mængder af smittefarlige partikler i rumluften.

Populært kan det udtrykkes som, at der er fire variable – eller fire knapper, der kan skrues på:



Figur 5: De fire vigtige parametre

På baggrund af den omfattende viden om luftkvalitet, har Center for Infektionshygiejne (CEI) anbefalet følgende for ventilation på operationsstuer med særlig infektionsrisiko:

CEI anbefaler, at der er ≤10 CFU/m^3 under aktivitet på stuen. Dette forudsættes opfyldt ved

- ventilation (TAF) med højt luftskifte, specialdragter og et begrænset antal personer på stuen eller
- ventilation (LAF) med min. indblæsningshastighed over operationsbord på 0,4 m/s og adfærd på stuen, som er tilpasset LAF-zonen
    - Planlagt personbelastning og
    - beklædning bør indgå som parametre, når beslutning tages om ventilationsanlæg, så der er klarhed, om kravene kan opfyldes

Der findes yderligere anbefalinger/krav omkring

- Anbefalinger for luftfugtighed
- Overtryk på stuen
- Overvågning af korrekte trykforhold

Grænseværdier for bakteriekoncentrationen på operationsstuer er defineret ved antal levedygtige bakterier pr. m³ rumluft og anført i Serum Instituttets Nationale Infektionshygiejniske Retningslinjer for det præ-, per- og postoperative område [1], samt referenceprogrammet fra Dansk Selskab for Hofte- og Knæalloplastik Kirurgi [19], der anbefaler, at kunstige led-operationer udføres på stuer med ultraren luft.

Den maksimale CFU-belastning under operation er i den sammenhæng angivet som 10 CFU/m³, uanset om ventilationstypen er LAF eller TAF. Luftens bakterier bæres fortrinsvist af partikler i størrelsesorden 4-20 µm [20], og flere studier har påvist god korrelation mellem luftens kimtal og måling af partikelstørrelser ≥5 µm [21-23], hvorfor man ofte sidestiller standardmåling af partikelstørrelser ≥5 µm med 'potentielt kimbærende partikler'.

Ved at begrænse antallet af partikler reduceres således også antallet af bakterier. Der findes imidlertid ingen internationalt accepterede grænseværdier for partikelforurening på operationsstuer, men en tendens i forskningslitteraturen peger i forbindelse med infektionsfølsom kirurgi (herunder alloplastik-kirurgi) på kravene til klasse 5 renrumsventilation, som er formuleret i ISO 14644-1 [24]

Der anbefales således følgende grænseværdier for en ultraren operationsstue, rengjort og uden personbelastning (tom): 3.520 partikler under 0,5 µm/m³ rumluft [25].

I Danmark er anbefalingen for konventionelle operationsstuer under 100 CFU pr. m^3 rumluft, og tilsvarende for ultrarene operationsstuer er anbefalingen maksimum 10 CFU pr. m^3 rumluft.

For at reducere luftkontaminering, ventileres operationsstuen med ren luft via TAF eller LAF operationsstue.

4.2 Energimæssig problemstilling

På den store klinge er temperaturstigning en global udfordring. På denne baggrund skrev 196 lande under på FN's store klimaaftale, omkring reduktion af udledninger af drivhusgasser, ved Pariseraftale i 2015. EU har på vegne af Danmark og de andre EU-lande meldt, at vi samlet vil sænke vores udledningen af drivhusgasser med 55 procent frem til 2030, og sænke vores CO2-udledninger med 39 % i forhold til niveauet i 2005. Reduktionen skal være indenfor en række områder, som transportsektoren, opvarmning af boliger og udledninger fra landbruget. En af de store energiforbrugere og dermed CO2-udledere, er sundhedssektoren.

Energiforbrug og ventilationsanlæg på hospitaler

Større offentlige bygninger tegner sig for en væsentlig andel af Danmarks samlede energiforbrug. Særligt er sygehuse en energikrævende bygningstype, som udgør 90 % af regionernes samlede energiforbrug. Region Hovedstaden forbruger årligt 183,9 GWh el (2013), hvor en gennemsnitlig husstand, 2 voksne og 2 børn, bruger 5200 kWh (2013). Det forventes, at sygehusenes elforbrug vil stige med 4 % om året, som følge af indfasning af mere avanceret (og elforbrugende) udstyr. I følge Go'Energi tegner ventilation, nedkøling af procesvarme og drift af medicoteknisk udstyr sig for knap 70 % af sygehuses elforbrug. Særligt ventilation er en energikrævende bygningsinstallation, som udgør 20 % af sygehuses elforbrug.

Det vurderes, at der i alt er ca. 700 OP-stuer i DK. De ca. 700 stk. dækker både private og offentlige stuer. Der eksisterer kun i ringe omfang viden om energibesparelsespotentialer i ventilationssystemer på operationsstuer, da dette nedprioriteres i forhold til hygiejnehensyn. Eksempler herpå er Sundhedsstyrelsens publikation 'Ventilation på operationsstuer – en medicinsk teknologivurdering' (2011) [26], den hollandske publikation 'Assessment of the performance of the air flow in an operating theatre' (2007) [27], VENTInet artiklen 'Personbevægelsens indflydelse på bakterietransport' (2006) [28] og den svenske energimyndihets puplikation 'Energieffektiv ventilation för sjukhus' (2017) [29] for at nævne nogle få.

Fremme af effektiv energianvendelse i større offentlige bygningsenheder i almindelighed, og sygehuse i særdeleshed, synes centralt placeret i energiselskabernes energisparerforpligtelser op til 2020. Regeringens strategi for effektiv energianvendelse er centralt placeret i bestræbelserne på at frigøre Danmark for anvendelse af fossile brændsler i 2050, hvilket dette projekt bidrager til gennem demonstration af energieffektivisering i operationsstuedrift. Projektet adresserer endvidere Energistyrelsens F&U-strategi 2005-2015 indenfor energieffektive teknologier, hvoraf projektet i særlig grad understøtter forskning, udvikling og demonstration indenfor ventilation, samt Effekt- og styringselektronik.

Der findes en række forskellige typer af ventilationsanlæg på sygehuse til operationsstuer, som hver især tjener forskellige formål. Fælles for dem er at opretholde et atmosfærisk indeklima, som primært har til formål at forhindre bakterie- og partikeltransport, som forøger risikoen for forekomsten af infektioner, og sekundært sikrer arbejdseffektivitet for sygehusets personale og patientkomfort. Ventilationen på operationsstuer er særlig interessant, idet der heri forefindes de mest strikse krav til ventilation, hvor luften i døgndrift skiftes 20-400 gange i timen uafhængig af operationsstuens brugstid. Dette gøres ud fra et uforholdsmæssigt forsigtighedsprincip, som ikke står til mål med driftsomkostningerne til el, køling og

varme, hvorfor der skønsmæssigt er et betydeligt energibesparelsespotentiale, svarende til 50-60 % eller op til 7,5 mio. kr. om året ved udvikling af styringsstrategier til optimeret drift af ventilation på operationer.

Der findes mulighed for reduktion af energiforbrug ved, at ventilationssystemet på operationsstuen har SetBack funktion iht. kommende CEN/TC 156 norm. I dag er der operationsstuer, som ventileres op til 17-24 timer i døgnet uagtet brugstiden af operationsstuen.

Ventilationsprincipper på operationsstuen

Der er primært to ventilationsprincipper, der benyttes på operationsstuer.

Det konventionelle princip, kaldet TAF – Turbulent Air Flow og den laminare, retningsbestemte indblæsning LAF eller unidirectional (UDF).

Der er yderligere to principper som er afledt af de 2 ovenstående

Et tredje system er en anderledes hybridløsning, som forener LAF og TAF kaldet Controlled dilution flow, som Halton Vita Space [30] betegner det. Her forenes fortrængning og fortynding uden en decideret traditionel LAF-del

Et fjerde system er et temperaturkontrolleret flowsystem, TcAF (Temperature Controlled Air Flow), med en LAF-del med underafkølet luft og omkringliggende indblæsning i loft med overtempereret luft til beskyttelse af LAF-strømmen [31].

De sidste to principper forholder projektet sig ikke til, da der ikke var operationsstuer, der kunne indgå i projektet.

Generelt for begge principper

For begge princippers vedkommende, skal der holdes et overtryk i relation til de omkring liggende oftest mere urene zoner, med et overtryk på OP-stuen på minimum 10 Pa. Overtrykket skal sikre, at kontamineret luft, fra omkringliggende rum/zoner, ikke trænger ind på operationsstuen. Der vil således være en luftstrøm fra ren mod uren zone.

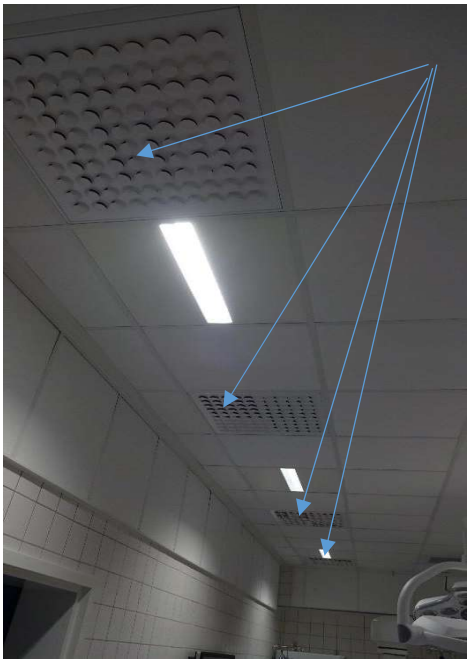
Døråbninger ind på OP-stuen fra mere uren zone, specielt ved indadgående døre kan medføre indtrængning af rumluft fra uren zone ind på OP-stuen. Derfor skal døråbninger undgås, eller slusefunktion benyttes, hvis denne er til stede.

De to ventilationssystemer bliver benyttet under den antagelse, at den indblæste ultrarene filtrerede luft på OP-stuen reducerer risikoen for infektion. Filtreringen er afhængig af filterklassen/filtreringsgraden af de anvendte filtre, og sammenholdes med krav til stuens renhedsklassificering, infektionsfølsomhed.

Definition af TAF

TAF (turbulent air flow) karakteriseres ved, at filtreret luft tilføres gennem indblæsningsarmaturer i loftet, udenfor opholdszonen med en tilpas høj indblæsningshastighed så der sker en induktion, opblanding med rumluften. Dermed opnås en rimelig ensartet fordeling af temperatur og forurening i hele rummet. Udsugning er typisk ved både gulv og loft.

Luftmængden størrelse svarende til et luftskifte på normalt 20 gange luftskifte pr. timemedfører, en fortynding og dermed en reduktion af mængden af kimbærende partikler Dette kaldes for opblandingsventilation og luftstrømmen har ingen defineret retning.



Figur 6: Loft I OP-stue med indblæsningsarmaturer

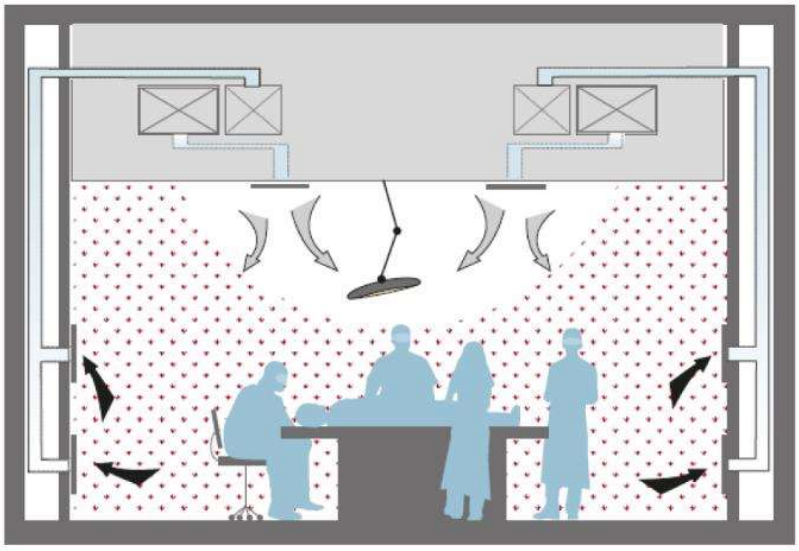
Luften tilføres ved loft, via indblæsningsarmaturer, udenfor opholdszonen (Pile på figuren til venstre).

Udsugning via riste normalt placeret ved gulvet.

Normalvis er der monteret HEPA filtre H13, H14 i ventilationssystemet før indblæsning på OP-stuen [32].

Alternativt i indblæsningsarmaturet. (Hospital Q)
Luftskiftet inkl. evt. recirkulering over HEPA-filter for TAF-stuer, vil typisk ligge på de 20 gange per time for TAF-stuer.

Nedenfor er vist ventilationsprincip for TAF (NIR 2011 [26])



Figur 7: Ventilationsprincip for en TAF-stue.

Definition af LAF

LAF betegner en ventilationstype, hvor den filtrerede luft blæses lineært, retningsbestemt og turbulensfrit, lav hastighed, ned over operationsfeltet. Princippet er, at I den indblæste, rene luft, hindrer indstrømning af den omgivende urene luft fra resten af lokalet. Den tilførte luft gennem LAF-delen er HEPA-filtreret. Typisk filterplacering er over LAF dugen i LAF delen.

HEPA-filterets tilbageholdelsesgrad af partikler er over 99,95 %. Gælder alle partikelstørrelser. [32]



Figur 8: Billede af loft i OP-stue

På figurer ovenfor tilføres luften vertikalt fra med lav hastighed over en dug, placeret i en LAF-del, der er integreret i loftet over operationslejet. Nogle LAF units har sideskørter, som på modellen vist til højre.

LAF-dele med horisontal indblæsning forekommer sjældent.

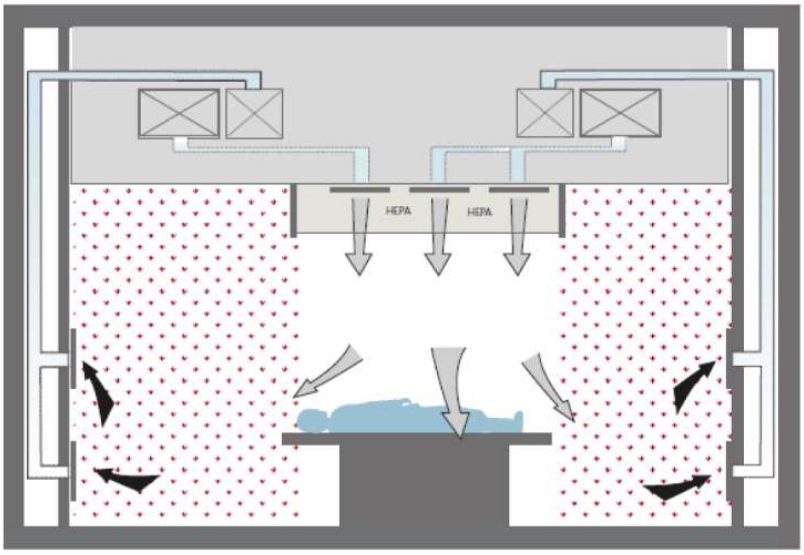
Indblæsningshastigheden vil typisk være ca. 0,3 - 0,5 m/s fra LAF-delen.

Den nødvendige lufthastighed under LAF- delen er afhængig af indblæsningstemperaturen (oftest underafkølet), afstand fra filterdugen til det kritiske område, varmekilder i luftstrømmen samt evt. andre fysiske luftmæssige forhindringer.

Den lave hastighed sikrer en laminar strømning ned mod operationslejet, samt hindrer at den omgivende luft trænger ind i LAF-zonen. Kun i randområderne af den laminare luftstrømning kan en begrænset induktion foregå (neutralzonen).

Formålet er, at alle forureninger fanges af luftstrømmen og transporteres bort fra den kritiske zone (LAF-zonen), som holdes beskyttet af den ultrarene luft.

Nedenfor er vist ventilationsprincip for en LAF-stue nedenfor (NIR 2011 [26]).



Figur 9: Ventilationsprincip for en LAF-stue.

Filter-, renhedsklasser

Nedenstående en oversigt fra FSTA [25] visende relationerne mellem infektionsfølsomhed, EU renrumsklasse, maksimalt kimtal (CFU/m³) og ISO-krav til partikelantal ved partikelmålinger for kontrol af OP-stuen.

Tabel 1. Vejledende projekteringsforudsætninger (skal læses sammen med efterfølgende definitionsark)

Type Infektionsfølsomhed Samlet vurdering af infektionsrisiko ved indgrebet.		1 Minimal	2 Mellem	3 Mellem	4 Høj	5 Høj
Klassifikation af operation		Småkirurgi ("Chirurgia minor")	Minimal invasiv udenfor opera-tionsafdeling	Større minimal	Ultraren uden LAF	Ultraren med LAF
Vejledende EU renrumsklasse		CNC – (Controlled Not	D	C	B	B
Dimensionsgivende krav til arbejdsmiljø og indeklima				5-15 personer	5-20 personer	5-20 personer
Maksimalt kimtal, middelværdi under operation i kritisk zone			200 CFU/m³	100 CFU/m³	10 CFU/m³ (1)	10 CFU/m³ (1)
Kontrolgrænse for antal partikler >0,5 µm pr. m³	Rummet rengjort og uden personbelastning		3.520.000	352.000	3.520	3.520
	Under operation			3.520.000	352.000	352.000
Mindste volumenstrøm total (nettoarealer)			8,3 l/s/m²	12,5 l/s/m²	16,7 l/s/m²	16,7 l/s/m² Eksklusiv LAF
Mindste volumenstrøm udeluft (nettoarealer)			5,6 l/s pr. m² dog mindst 333 l/s	5,6 l/s pr. m² dog mindst 333 l/s	5,6 l/s pr. m² dog mindst 333 l/s	5,6 l/s pr. m² dog mindst 333 l/s
Anbefalet nettoareal af OP-stue			40 m²	60 m²	80 m²	80 m²
Overtryk i forhold til mindre rene områder				10-15 Pa	10-15 Pa	10-15 Pa
Anbefalet slutfilter iht. DS/EN 779 og DS/EN 1822		F7	F9	H14	H14	H14

(1) Kim koncentration er vejledende værdier fra SSI. Disse vil ikke nødvendigvis være opfyldt ved anvendelse af de anbefalede minimumsluftmængder. Det vil altid være nødvendigt at udføre en konkret ventilationskalkulation for det enkelte projekt. Her indgår analyse af alle beladstningskilder som vigtige input.

6

Figur 10: Oversigt over vejledende parametre i relation til infektionsfølsomheden

Infektionsfølsomhed for OP-stuer defineret til operationer, hvor der indsættes kunstige led (klasse 4 og 5).

Klasse 4 er for TAF, og klasse 5 er for LAF stuer.
Relateret til krav til partikeltest iht. til ISO-normen er vist tabel fra FSTA's vejledning nedenfor [25].

	I hvile		I drift		Mikrobiologisk kontaminering
Klasse	Maximalt tilladt antal partikler pr. m^3 luft				Maksimalt antal CFU pr m^3 luft
	≥ 0,5 µm	≥ 5 µm	≥ 0,5 µm	≥ 5 µm	
A	3.520 (ISO 5)	20("ISO 5")	3.520 (ISO 5)	20("ISO 5")	< 1
B	3.520 (ISO 5)	29 (ISO 5)	352.000 (ISO 7)	2.900 (ISO 7)	10
C	352.000 (ISO 7)	2.900 (ISO 7)	3.520.000 (ISO 8)	29.000 (ISO 8)	100
D	3.520.000 (ISO 8)	29.000 (ISO 8)	-	-	200

Figur 11: Renrumsklasser i henhold til ISO-standarder. Tabel fra FSTA's vejledning 2014.

Der ses, at OP-stuen, til alloplastik med infektionsfølsomhed på 4 og 5, svarer til klasse B med tilhørende ISO-klasse krav 5 for partikeltest på OP-stue i hvile (At Rest) og i drift ISO-klasse 7 med tilhørende krav til mikrobiologisk kontaminering, på CFU/m^3 ≤10.

Vejledningen fra FSTA [25] stemmer overens med vejledning fra NIR 2020 [1], dog er der forskelle omkring, hvilke datasæt der er medtaget.

Tekniske krav til ventilation

Infektions-følsomhed	Minimal	Mellem	Mellem	Høj	Høj
Stuetype	1	2	3	4	5
Maksimal CFU-belastning under operation (CFU/m^3)	Ingen anbefalede grænseværdier	200	100	10	10
Luftskifte/time	Ingen anbefalede grænseværdier	10	15	20	20
Samlet volumenstrøm (l/s/m 2)*		8,3	12,5	16,7	
Lufthastighed i operationsfeltet (m/s)					min. 0,4
Trykdifferens til omgivelser (Pa)	(+)	+10-15	+10-15	+10-15	+10-15
Luftfugtighed (% rh)	<70	<70	<70	<70	<70
*tidligere betegnet som antal luftskifte per time					

Figur 12: Tekniske krav til ventilation.

Filterklasser er defineret iht. evnen til at tilbageholde partikler, uden gennembrydning af filtermaterialet.

Nedenstående viser de forskellige ISO-standarder i relation til MPPS (most penetrating particle size) for HEPA filtre H11 til H14 samt finfilter F9.

Tabel: Filtertype, klassifikation og specifikationer [32]. MPPS, mest penetrerende partikelstørrelse; Em, gennemsnitseffektivitet; ePM_x, gennemsnitseffektivitet på partikler ≤ størrelsen på X µm.

Filterklassifikation ifølge EN 1822	Filtergrupper ifølge ISO 29463	Total effektivitet på MPPS	Lokal effektivitet på MPPS
E11 (H11)	ISO 15 E	≥ 95 %	-
	ISO 20 E	≥ 99 %	-
H13	ISO 35 H	≥ 99,95 %	≥ 99,75 %
	ISO 40 H	≥ 99,99 %	≥ 99,95 %
H14	ISO 45 H	≥ 99,995 %	≥ 99,975 %
	ISO 50 H	≥ 99,999 %	≥ 99,995 %

Filterklassifikation ifølge EN 779	Gennemsnitseffektivitet for partikelstørrelse 0,4 µm	Filterklassifikation ifølge ISO 16890 [33]		
F9	≥ 95 %	ePM_1	$ePM_{2.5}$	ePM_{10}
		80-90 %	85-95 %	90-100 %

Figur 13: Tabel over klassificering og specifikationer af filtertyper.

Den nødvendige luftmængde, både udeluft og samlede indblæsningsluftmængde skal bestemmes vha. beregning, hvor bl.a. følgende parametre indgår: Antal personer, Kildestyrke pr person (cfu/s) samt ønsket kim koncentration (cfu/m^3).

Krav til oprensningstid. Nye CEN/TC 156 standard skærper kravet < 15 minutter for operationer med høj risiko.

Jo mere korrekt filtreret luft, der tilføres OP-stuen, jo mere fortynding af forureninger opnås, og dermed forbedres den mikrobiologiske situation på OP-stuen, med reduceret risiko for infektion.

Der konstateres også, at i tabellen fra FSTA øges både luftskifte og anbefalet areal for OP-stuen (80 m^2), ved klasse 4 og 5 stuer.

Korrekt luftmængde er vigtig, primært omkring det mikrobiologiske aspekt, men påvirker ligeledes de energimæssige forhold for ventilationsanlæggets drift. Dette undersøges også i projektet.

Ventilationsprincip og risiko for infektion

Nogle undersøgelser anbefaler LAF-princippet, fordi undersøgelserne har vist, at når ortopædkirurgiske operationer foretages i ultrarene LAF ventilerede OP-stuer, er der færre infektioner [4, 6, 20, 34-37].

Andre undersøgelser finder ingen infektionsmæssig forskel mellem LAF og TAF, og nogle undersøgelser kommer frem til, at operationer på LAF stuer giver en øget infektionsrate [38-42].

I tillæg bør aspektet omkring investerings- og driftsomkostninger inddrages, herunder specifikt energimæssige omkostninger og mulige optimeringer på dette felt, uden at påvirke den mikrobiologiske sikkerhed på Op-stuen.

4.3 Motivation for projektet

Det er det studie, der er en videreførelse af OP-Vent 1 projektet (OP Vent - Energieffektiv ventilation på operationsstuer | Elforsk) [9].

Studiet blev udført som et mockup studie, hvilket vil sige uden patienter med anvendelse af en opvarmet dukke på reelle operationsstuer på Gentofte hospital.

Vi simulerede udførelse af hofteoperationer på fuldstændig naturlig vis med anvendelse af alle instrumenter og personalet på operationsstuen.

Studiet viste, at det var muligt at nedsætte ventilationsmængden med 50 % og det relaterede energiforbrug med ca. 40 %, uden at gå på kompromis med antallet af mikroorganismer (CFU) på operationsstuer med LAF.

Derimod var det ikke muligt at nedsætte ventilationen på operationsstuer med TAF uden stigning i CFU. Samtidig fandt vi på TAF-stuer ved 100 % ventilation, at det er ikke var muligt at opretholde et mikrobiologisk miljø, som overholder de gældende retningslinjer i henhold til ISO-standard og de danske retningslinjer fra sundhedsmyndighederne.

Set i lyset af at en række af de nye supersygehuse planlægges med operationsstuer med TAF-stuer, har vi fundet det væsentligt at undersøge energiforbrug og forekomst af mikroorganismer på både LAF og TAF-stuer under normal hospitalsdrift, direkte under rigtige operationer og under samtidig måling af mikroorganismer.

Perspektivet med dette er at afdække mulighed for at nedsætte energiforbruget gennem nedsat ventilationsmængde på operationsstuer med LAF eller TAF. Der er store perspektiver i at kunne spare energimængder bare nationalt, men også internationalt, især hvor der anvendes LAF stuer. Udover den rene mulige store energibesparelse, kan der også være patient- og samfundsmæssige besparelser ved anvendelse af LAF frem for TAF, hvis LAF nedsætter kontamineringsrisikoen.

Projektet har stor nyhedsværdi, da der aldrig før i Danmark eller i Europa er foretaget live operationer, hvor der samtidig vil blive foretaget analyser af såvel energiforbrug samt bakteriologiske undersøgelser.

5 Formål med OPVent 2 projektet

Projektets overordnede formål er at undersøge forekomst af mikroorganismer på LAF og TAF-operationsstuer, målt under real-life operationer, samt beregne energiforbruget.

De specifikke formål er

1) at undersøge antallet af CFU' er ved operationer udført på LAF og TAF-stuer
2) at undersøge betydning af adfærd målt som dør- og gennemstikskabsåbninger på operationsstuen
3) at måle energiforbruget ved hver operation
4) at beregne mulig besparelse af energiforbrug ved optimering af en række parametre

Projektet gennemføres på 15 hospitalsmatrikler, hvor der udføres hofteoperationer, fordelt på operationsstuer med LAF- og TAF-ventilation.

6 Studie design

Projektet er designet som et simpelt prospektivt studie med kontinuerlig opsamling af data.
Der blev foretaget pilotforsøg på Odense Universitetshospital (OUH) mhp. at kvalificere de endelige studier.

Der blev indbudt 30 hospitaler i alt, hvoraf 15 kunne deltage (Se figur nedenfor; udvælgelsesproces).
Operationerne blev udført fra marts 2017 til juli 2020.

Der blev foretaget målinger på 12 operationsstuer med LAF og 5 operationsstuer med TAF. Alle LAF ventilationsanlæg var af den vertikale type.

Alle LAF stuer opfyldte ISO klasse 5 (DS/EN ISO 14644-1:2015), mens alle mulige hospitaler med TAF-stuer blev inkluderet.

Alle målinger er gjort ved live-operationer med indsættelse af kunstig hofte eller knæ, mhp. at få det reelle billede på operationsstuerne i Danmark.

Der blev målt på i alt 51 operationer.

Følgenden hospitaler er inkluderet:

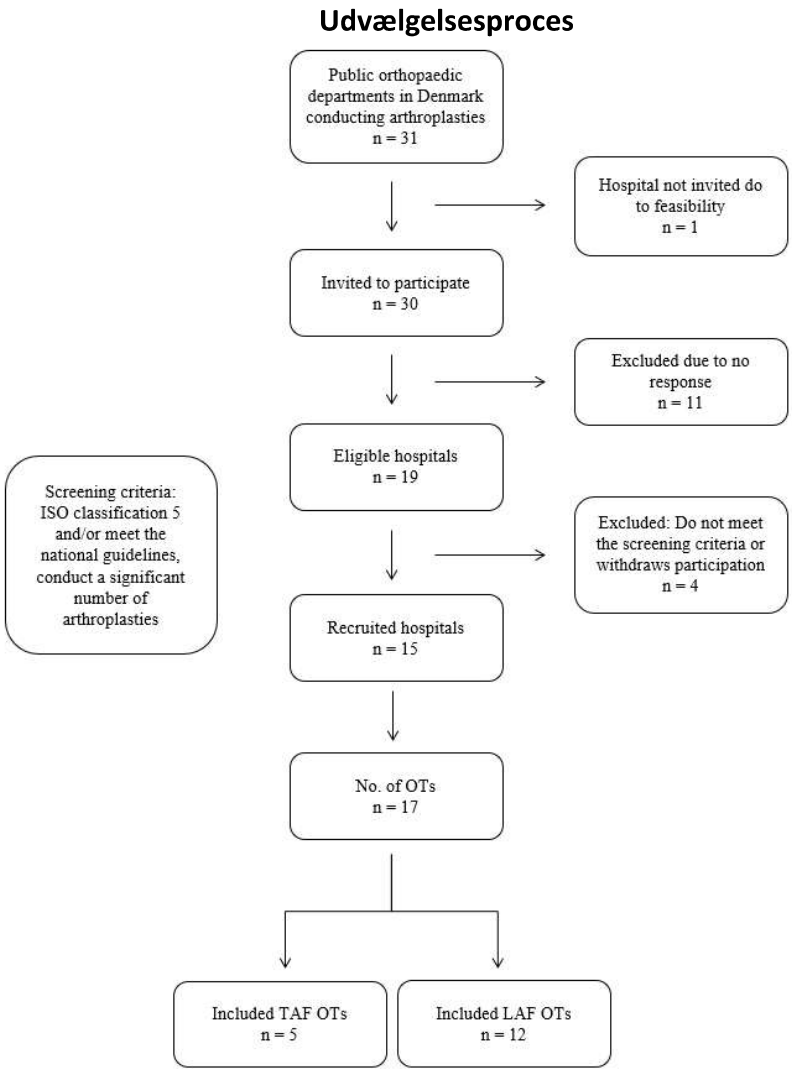
Region Nordjylland
- Farsø
- Frederikshavn

Region Midtjylland
- Århus Universitetshospital
- Holstebro

Region Syddanmark
- Vejle
- OUH Odense
- OUH Svendborg
- Grindsted
- Esbjerg
- Sønderborg

Region Sjælland
- Nykøbing Falster
- Næstved

Region Hovedstaden
- Hvidovre
- Hillerød
- Gentofte



Figur 14: Udvælgelsesproces.

Forsøgsopstilling

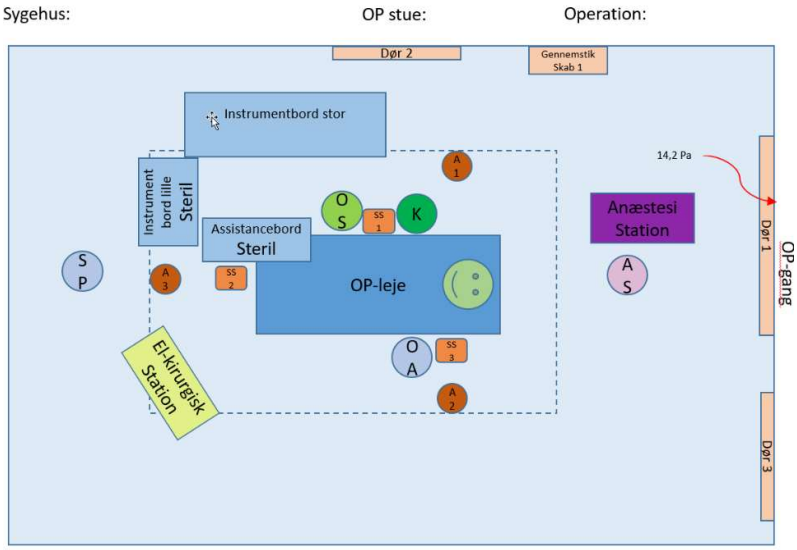
Af skitsen nedenfor fremgår opstillingen, som kan ses i detaljer i bilag 1.

Der blev udviklet en custom-made holder, trefod til agarpladerne.

Foto fra live-operation.



Figur 16: OP-stue med agarplade.



Figur 15: Skitse over OP-stue

Signaturforklaring:

K:	Kirurg
OA:	Operationsassistent
OS:	Operations sygeplejerske
AS:	Anæstesi sygeplejerske
SP:	Sygeplejerske
O:	Observatør
Ø:	Øvrige

Måling af CFU

Der blev anvendt både aktiv og passiv opsamling.

Aktiv opsamling

Aktiv opsamling blev målt som CFU/$m^{3,}$ og blev udført under hver operation påtre forskellige steder. Figur 15 foregående side.

Vi anvendte en luftprøvetager, air sampler, (Spin Air IUL-5500) over en 10 minutters periode. Indstillet luftmængde var 100 l/min, hvilket resulterer i én m^3 luft nedover en 90 mm agarplade.

Agarpladerne indeholdt 5 % hesteblod [43]. Den første position var ved den kirurgiske instrumenterings bord. Målingen startede, når leddet blev åbnet. Luftprøvetageren var placeret ved midten af bordet, ca. 5 cm fra kanten. Den anden måling var 30 cm fra operationssårets niveau, i forbindelse med at lårbenet blev forberedt. Mhp. at have en kontrolmåling, blev den tredje måling udført 30 cm over patientlejet på led niveau, ca. 30 minutter efter rengøring af den tomme og forladte operationsstue.



Figur 17: Spin Air IUL-5500.

Passiv opsamling på agarplader

Passiv sedimentering på agarplader blev udført på tre steder i LAF -områdets periferi under operation (figur 15 foregående side). Pladerne blev placeret ens på LAF og TAF-stuerne. Målingen varede fra kirurgisk snit til tidspunktet for sårlukning. Værdierne blev omregnet til, at operationen have taget én time (CFU/m^2/h).

For hver kirurgisk procedure havde vi en kontrol agarplade, som stod uåbnet på operationsstuen. Den blev håndteret på samme vis som de øvrige agarplader.

Agarpladerne blev inkuberet i 48 timer ved 35 grader Celsius under standard forhold. Efterfølgende blev antallet af CFU'er talt. Der blev ikke udført nogen identifikation af arter.

Der er foretaget registrering af målepunkter, personale- og udstyrsplacering, samt OP-stuens opbygning for hver operation.

Der henvises til Bilag for de enkelte hospitaler A – Q. under Bilag 5.

Beklædning og adfærd hos operationspersonale

Alt personale var iklædt barrieredragt. Operationsteamet og observatøren, der foretog den aktive air-sampling, bar steril kirurgisk påklædning til engangsbrug. Specifikt kan nævnes steril kittel (EN 13795 HP 3), steril hætte, kirurgisk maske (ikke steril) og to par sterile handsker [1]. Det øvrige personale bar ikke-steril påklædning, som refererer til en operationshue og kirurgisk maske. Der var ikke krav til at anæstesisygeplejersken skulle bære kirurgisk maske. Antallet af åbninger af døre og gennemstiksskabe, samt antal personer og deres beklædning blev noteret under operationen. Gennemstiksskabe er placeret i væggen i operationsstuen, og muliggør at mindre udstyr, prøver o.l. kan bringes ind eller ud af operationsstuen med minimal luftudveksling og trykændring. De anvendes til at minimere risikoen for kontaminering af luften, som døråbninger kan forårsage. Det kunne dog ikke dokumenteres, at gennemstiksskabe altid blev anvendt korrekt, og ikke i stedet som social interaktion mellem operationspersonale og eksternt personale. Derfor kan der argumenteres for, at åbninger af døre og gennemstiksskabe kan flettes til én variabel, nemlig samlede antal åbninger.

Observationsskema er udført for hver af de 51 operationer. Eksempel vist nedenfor.

Dato: 28.11.2019	Lokation: B	OP-stue: a	Operation nr.: 2	Start Knivtid: 12:00	Slut. Sårluk: 13:09

Personale	Antal	Steril	Bemærkninger	Agarplade	Label (Label udfyldes med stamdata og påklæbes på agarplade i bund)	Start:	Slut:
Kirurg (K).	1	1		Holder 1 (A1)	✓	12:00	13:09
OP-assistent (OA)	1	1		Holder 2 (A2)	✓	12:00	13:09
OP-sygepjerske (OS)	1	1		Holder 3 (A3)	✓	12:00	13:09
Anæstesi sygeplejerske (AS)	3	-	Opstart 3, 2 går ud 12:04. 1 ind 12.33 og 1 ud 12:35	Slit-sample 1 (SS1)			
Sygeplejerske (SP)	2	-		Slitsample 2 (SS2)	✓	12:08	12:18
Observatører (O)	2	1	Måletekniker, slit-sampler, steril påklædt	Slitsample 3 (SS3)	✓	12:34	12:44
Øvrige (Ø)							

Observationer						
Åbninger	Antal og tidspunkt	Åbning Nr.	Antal og tidspunkt	Åbning Nr.	Antal og tidspunkt	Åbning Nr.
Dør	1/12.04.	2				
Gennemstikskab	1/12:12, 2/12:33, 3/12:35, 4/12.52 (1 SP ud)	1	5/12:54	1		
Utilsigtet hændelse (Beskrivelse og tidspunkt)						
Kommentarer	SS3 Blodstænk 1 dråbe					

Figur 18: Eksempel på et observationsskema

Teknisk vurdering

Målingerne for areal og volumen blev udført med en lasermåler (Hilti® PD22).

LAF-hastighed og total luftmængde blev vurderet ved to metoder.

En metode måler den samlede indblæste luftstrøm og delluftmængder i tilstødende ventilationskanalsystem til operationsstue og LAF med en kalibreret thermoanemometer, VelociCalc Multi-Function måleinstrument (TSI® 9565-P).

TSI 9565 er opsat til at generere et gennemsnit for hver 4 sekunders sampletid, samt et gennemsnit for det samlede antal målinger. Målt værdi for luftmængde, i henhold til EN12599, divideret med målt/beregnet LAF-areal, gav således LAF-hastigheden. Denne metode blev brugt, når systemet havde en ekstern ventilator eller luftbehandlingsenhed til LAF-delen.

Den anden metode var vurdering af testdata fra den årlige kontrolrapport i henhold til DS/EN 14644-3, B-2, og blev brugt, hvor LAF havde indbygget interne ventilatorer.

Udendørs luft til operationsstuen blev altid målt ved den tidligere metode med TSI® 9565-P uanset ventilationstype.

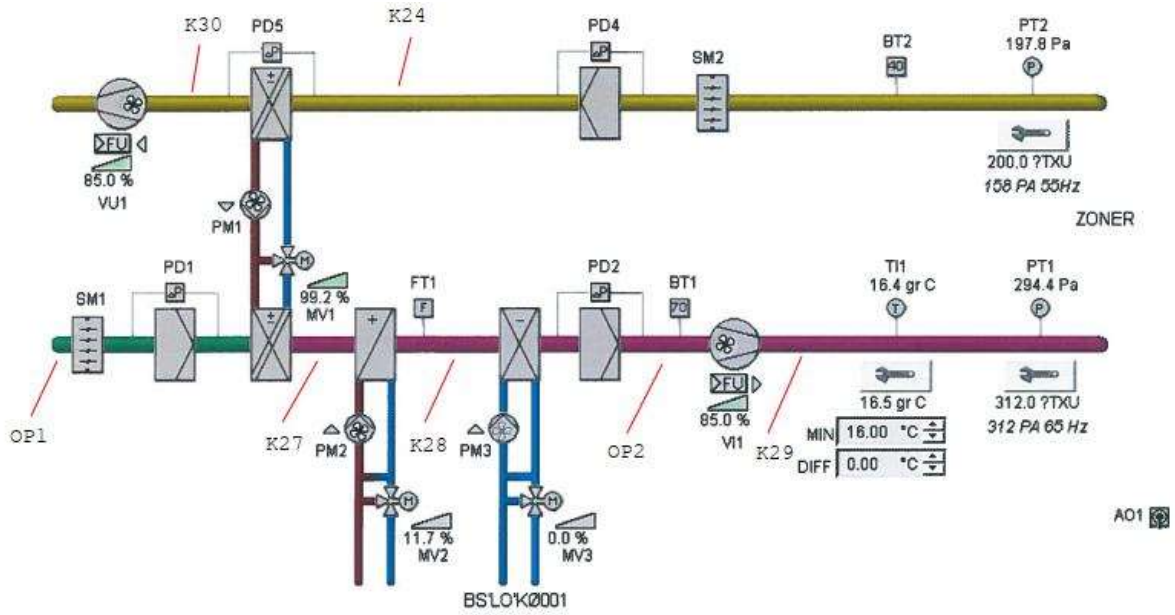
Maksimalt positivt lufttryk blev målt med et pitotrør tilsluttet for måling af statisk tryk og forbundet til kalibreret TSI® 9565-P. Målt på tom operationsstue i driftsmodus normalt gennem en eksisterende åbning. – typisk under dør. Sampletid på 4 sekunder med beregnet gennemsnitsværdi.

Filtertypen blev registreret ved inspektion på stedet, årlig testrapport i henhold til DS/EN 14644 eller filterliste fra teknisk afdeling. Effektforbrug for ventilatorer målt med Kyoritsy poweranalyzer 6315 over ca. 1,5 døgn.

Statisk tryk i ventilationsanlæg er målt med TSI® 9565-P for vurdering af tryktab over komponenter. Dynamisk tryk beregnet/erfaringsvurderet for beregning af virkningsgrad for ventilatorer sammenholdt med det målte effektoptag.

Temperaturforhold og- ændringer i ventilationsanlæg, OP-stue og tilhørende udekondition er langtidsmålt med TinyTag temperaturloggere og udvalgte steder vha. temperatur/fugtighedstypen.

Eksempel vist nedenfor visende indplacering af temperaturloggere. Rød streg forbinder målested til TAG nummer for logger.



Figur 19: I-diagram med vist placering af målepunkter for temperaturloggere

Databehandling af temperatur- og effektlogninger er analyseret vha. et Enerlog-program for tidsudsnit, svarende til ønskede perioder såsom operationstiden, Set Back mv.

Gennemsnitsværdier og driftskarakteristika som input til videre beregninger omkring energiforbrug for ventilering OP-stuen og analyse og beregning af optimeringsmuligheder.

Eksempel på effektoptag ventilatorer i anlæg VE03, Hospital B.



Figur 20 : Eksempel på effektoptag ventilatorer i anlæg VE03, Hospital B.

Eksempelvis ses der udfald af udsugningsventilator d. 28.11.2010 kl. 10.05, hvor airsample måling blev foretaget.

Dette kunne også ses på airsample målingen, som overskred 10 CFU/m³. Alle øvrige airsample målinger ved normal drift lå under 10 CFU/m³.

Tilsvarende findes diagrammer for temperaturlogninger. Kurver kombineret i samme diagram efter behov i Enerlog.

Parametre for den enkelte operationsstue

Ved screeningen er der udfyldt checkskema, som er sammenholdt med luftmængde-, tryk- og spotmåling af effektoptag til ventilatorer.

Som tidligere anført er der udført, før og under live operationer, genmåling af luftmængder, trykforhold samt langtidsmåling af effektoptag og temperaturer.

Checkskemaer for hver enkelt OP-stue kan ses under bilag 5.

Nedenfor et eksempel.

Dato for registrering: 30.11.2018 **Operationsstue nr.: a Hospital B**

Relevante standarder:_____

Hvilket år er operationsstuen etableret: 2005

1	Operationsstue - anvendelse (fx kan operationsstuen kun anvendes til specielle operationer eller alle typer.) – billeder af operationsstue før forsøg	Tekst: Alloplastiske operationer mm. Billede nr: Se billeddokumentation
2	Beskriv fysisk placering af operationsstuen (fx Etagenr. osv.)	Etage 2 Bygning B
3	Påfør rummets fysiske dimension (fx H=1900mm, B=1000mm, D=600mm)	L=6643 B=5900 H=2780 Huk LAFskørt=2000. Huk LAF =2780
4	Påfør hvor mange adgangs muligheder, som er til operationsstuen (lukker dørene indad eller udad)	1 ED ind fra OP-gang. 1 ED ind fra lægevask
5	Er der sluse for at komme ind på operationsstuen?	Nej
6	Tag foto af operationsstue med lukkede døre – påfør foto nr.	Se billeddokumentation
7	Er der mulighed for at skabe overtryk i operationsrummet? (Måling i Pa)	Ja. 11 Pa mod OP-gang. 11 Pa mod Lægevask. Uds. Stopper kortvarigt med overtryk på 60 Pa tilfølge. Kontamimering målt under operation.
8	Er der mulighed for dagslys indfald? (foto nr:)?	Ja 3 stk. vinduer
9	Klimaskærmens varmetab?	Facade og vinduer
10	Effektbelastning i Watt (fra personer, it-udstyr, belysning, processer m.m.) Op-belysning.	Se liste bagerst i rapporten

Figur 21: Eksempel på checkskemaer til OP-stue.

11	Bortledning af operationsgasser – beskriv bortledningen (Her tænkes der også på særlige krav til ventilationsanlægget)	Vha. udeluftventileringen
12	Findes der gældende/opdaterede tegninger over operationsstuen?	Ja
13	Findes der gældende/opdaterede tegninger over ventilationsanlægget?	Ja
14	Påfør hvor nærværende operationsstue ventileres fra (fx fra ventilationsanlæg nr. xxx - placeret i kælder)	Anlæg VE03 i teknik Plan 3
15	Hvornår er sidste eftersyn fundet sted? (kopi af servicerapport ønskes)	
16	Hvorfra indtages friskluft til ventilationsfilteret	Tagflade via rist i tagflade
17	Filtertype - noteres (Herunder også hvis der er problemer med tæthedsgrad – ved tvivl måles og noteres)	VE03. Forfilter F7=> F9 til TAF i anastæsi. lægevask etc.. Udeluft fra VE03 fødes ind i recirkulationen for LAF del før F7=>F9=> H13 over dugover dug.
18	Hvor mange filtre skal luften igennem inden den indblæses på operationsstuen med TAF?	2. til TAF 3 til LAF del idet forbehandlede luft fra VE03 indgår i recirkuleringen LAF.
19	Trykfald over for filter noteres (Trykfaldsmåling – Δp i mbar eller Pa.)	
20	Dato for sidste udskiftning af ventilationsfilter	1gang årlig F7, F9. Hvert 2 år, H13
21	Forefindes der alarmgivning på ventilationsfilteret? (f.eks., ved stort trykfald eller for lille trykfald)	Ja. CTS
22	Vedligeholdelse Logbog for registrering af vedligeholdelse	Stor sandsynlighed. Bravida
23	Effekt i kW størrelse på installeret ventilationsmotor.	3,5 kW indbl. 2,2 kW uds.
24	Kan effektoptaget på motoren reguleres? (reguleringsform – spjæld, frekvensomformer eller andet)	Ja. FRZ

Figur 22: Eksempel på checkskema til OP-stue.

25	Beregning af ventilationsanlæggets virkningsgrad	
26	Hvor mange m^3 luft indblæses på operationsstuen? (Der skal foretages måling af indblæst luftmængde)	Se skema bagerst
27	Hvor er indblæsningsarmaturerne placeret? (i loftet eller?)	Indblæsning sker i recirkuleringen for LAF
28	Hvor er udsugningsarmaturerne placeret? (i gulvet eller?)	4 stk i loft TAF. LAF recirkuklering i loft
29	Forefindes der recirkulation af ventilationsluften? (Der spørges indtil opbygningen af ventilationsanlægget – foto tages gerne)	Nej. Kun LAF del recirkulerer.
30	Antal luftskifte i timen? (Beregninger skal udføres) Her vil det være rigtig godt hvis der er mulighed for at udarbejde noget grafik med luftskiftet som funktion af bakterie dannelsen – hvis det er muligt.	Se sidst i notat
31	Er der monteret varmegenindvinding på ventilationsanlægget? (Evt. genvindingsprincip)	Ja. Koblede batterier
32	Operationsstuens ventilationsprincip (TAF eller LAF) – HUSK billeder	LAF
33	Kan reguleringen af luftmængden foretages i operationslokalet? (forklar hvordan styringen er etableret)	Ja. Betjeningspanel til højre ved dør fra OP-gang. Laminar og reduceret drift
34	Er ventilationsanlægget koblet til køleanlæg?	Ja. Centralt køleanlæg
35	Finder der procesudsug på operationsstuen? (Her tænkes konkret på punktudsug)	Ja. 2 stk separat sug. 1 kører konstant men ingen effekt luftmængdemæssigt.
36	LAF delens fysiske mål på Op-stuen	2950*2950
37	CTS billede over anlæg Kan variable parametre i CTS logges mhp. trendkurver? Eksport CSV fil?	Ja. Logning måske mulig.

Figur 23: Eksempel på checkskema til OP-stue.

Al energiforbrugende elektrisk udstyr på specifik operationsstue.
Registrering af max. effekt for udstyr på OP stuen.

Antal	Fabrikat	Funktion	Spænding U (V)	Strøm I (A)	Effekt (kW)	Samlet effekt (kW)	Bemærkninger
1	Clinio 424				0,08	0,1	75 VA
1	Siesta TS		230	10	2,30	2,3	Max. effekt
1	KLS Martin Maxion				0,60	0,6	
1	Atmos Atmossafe				0,40	0,4	8VA
1	PC skærme				0,08	0,1	
1	Tournequet ATS 5000						Trykluft.
1	Astropad				0,20	0,2	
4	Agilia Injectomat				0,08	0,3	75 VA
2	OP lamper LED				0,16	0,3	
8	Belysning	LAF			0,11	0,4	2x54 W
8	Belysning	Uplight			0,04	0,3	2x18W
Total						**5,0**	

Figur 24: Skema for registrering af max. effekt på OP-stuen.

Af hensyn til patientsikkerhed, under live operationen, er der ikke målt på effektoptag på udstyr.
Typisk effektbelastning er 7 personer a 0,1 kW
Belysning 0,3 kW,
OP-lamper 0,3 kW,
Div. PC-skærme 0,2 kW,
Varmetæppe, her Astropad på kun 0,2 kW men meget benyttet Mistral Air er på 0,9 kW ved 37-39 °C
Belysning 0,5-0,7 kW
Diatermi i gennemsnit 0,2 kW
Anæstesistation 0,8 kW
I alt ca. 3-4 kW

Luftmængder målt på specifikt anlæg.

Form	TAF/LAF Recirk./Afkast Udeluft	Målested	Kanaldimension	Areal (m²)	Målt lufthastighed (m/s)	Luftmængde (m³/h)	Bemærkninger
Indblæsning							
Udeluft	U	MPI 3,1	350x300	0,105	5,73	2.166	VE03 indbl. 54,7 Hz. 2,5 kW
Recirkulering LAF	R	Display	2950x2950	8,7	0,18	5.638	0,18 m/s over dug er for lidt. Er indreguleret til 0,3 m/s i 2005. Manko svarer til at en ventilator ud af de 6 stk (1250 m³/h) ikke er i drift. Bør undersøges.
						0	
						0	
Udsugning							
Uds. Facade	T	MPU 3,6	ø250	0,049063	3,76	664	VE03 uds. 51Hz. 0,9 kW
Uds. Ved gang	T	MPU 3,1	ø250	0,049063	2,77	489	
Punktsug	A		ø100	0,00785	13,79	390	
Punktsug koblet på VE03						0	Der er ingen udsugning at mærke i OP1!
						0	

Luftmængder. Opsummering (m³/h)	OP1
Udeluft	2.166
Recirkuleret	3.472
Indblæsning	5.638
Udsugning	1.543

Figur 25: Skema for luftmængder målt på specifikt anlæg.

Lufthastigheder er målt, luftmængder beregnet med angivelse af målested og driftsforhold for ventilationsanlægget under målingerne. Opsummering hovedluftmængder til OP-stuen.

Måling på specifik OP-stue.

Hvide felter er målinger og grønne beregninger.

Ventilator	Note	Hastighed (m/s)	Rund kanal (ø i m)	Firkant B (m)	Firkant H (m)	Kanalareal (m²)	Luftmng. (m³/h)	Sugeside Ps	Sugeside Pd	Trykside Ps	Trykside Pd	ΔPt (Pa)	Effektoptag (kW)	ή ventilator
IK3	OP1	5,5		0,3	0,35	0,105	2.079					0		
	OP2	4,36		0,3	0,35	0,105	1.648							
	Steril, skyllerum	1,84		0,3	0,35	0,105	696					0		
	54,7 Hz						4.423	-587	0	415	20	1.022	2,8	0,45
UK3	3.10 OP1 og OP2 og div. Hovedkanal	3,29		0,4	0,5	0,200	2.369	-347	0	106	20	473	0,8	0,38
LAF del							*5.832*					*200*	*0,7*	*0,44*

Figur 26: Skema for måling på specifik OP-stue og beregnede virkningsgrader for ventilatorerne.

Lufthastigheder er målt og luftmængder beregnet på hovedanlæg, der betjener aktuelle OP-stue med angivelse af målested og driftsforhold for ventilationsanlægget under målingerne

Målt trykforhold omkring ventilator statisk tryk på suge- og trykside.
Virkningsgrad for ventilatorer er beregnet med tillæg af det dynamiske tryk til den statiske trykstigning.

Trykforhold/ virkningsgrad omkring LAF ventilatorer er oftest vurderet ud fra erfaringsværdier for LAF-moduler.

Tekniske beregninger

Efterfølgende er en kort opsummering af metode og fremgangsmåde, som er beskrevet mere detaljeret under Bilag 2.

Oversigt status OP-stuer
Antal luftskifter er bestemt ud fra beregnet rumvolumen og målte luftmængder.

LAF hastigheder som beskrevet under teknisk evaluering.

Temperaturvirkningsgrad for varmegenvinding beregnet ud fra Tinytag temperaturlogninger midlet over operationstiderne og set backperioden, aften og nat. Temperaturvirkningsgrad er tør virkningsgrad uden kondensation iht. DS 447.
Virkningsgrader for ventilatorer beregnet ud fra statiske trykmålinger før og efter ventilator med tillæg af dynamisk tryk.
Effektoptaget til ventilator er den med Kyoritsy 6315 målte effektoptag. I få tilfælde målt med powermeter Chavin Arnoux CA 8220.
Alle data er indført i fælles oversigtsskema for alle OP-stuer.

Energiforbrug og -besparelser.

For beregning af energioptimering drift af de aktuelle OP-stuer opdeles energiforbruget i 3 scenarier.

Beregnede energiforbrug er fordelt på:

- Energiforbrug el til drift af ventilatorer i ventilationsanlæg og LAF del på OP-stuer.
- Energiforbrug til køling af indblæsningsluftmængden. Der fastsættes en COP-faktor gældende for alle Op-stuer.
- Energiforbrug til opvarmning af indblæsningsluftmængden.

De tre scenarier for reduktion af energiforbrug:

As is

Det aktuelle energiforbrug beregnet ud fra de foretagne målinger af temperaturer, effektoptag, luftmængder etc.

Level 1

Reducering af den driftstid hvor OP-stue ventileres som værende i OP-modus.

Der er observeret, analyseret ud fra målingerne, at OP-stuerne i dagtimerne, hvor operationer normalt foretages, ventileres med maksimal luftmængde, selvom operationer er ophørt, og OP-stue er tom.

Level 2.

Reducering at udeluftmængden og samlet luftmængde for ventilering af OP-stue udenfor brugstiden af stuen. Set Back (SB) perioden.

Parametre for Set Back perioden tager udgangspunkt i den kommende CEN-standard 156 omkring OP-stuer.

Der indbygges øgede renhedsmæssige krav udover anbefalingerne i standarden for at reducere oprensningstid mest muligt.

Brugstiden er med udgangspunkt i den i Level 1 beregnede værdi.

Reducering luftmængde sker vha.:

- Reducering lækageareal ved tætning åbninger til tilstødende rum og arealer som step 1.
- Reducering overtryk til 12 Pa i OP-modus.
- OP-stuer hvor målte værdier ligger lavere end 12 Pa, da øges udeluftmængden således at 12 Pa overtryk opnås.
- Reducering overtryk til 8 Pa i SB-perioden med lavest mulige luftmængder.
- OP-stuer hvor beregnet overtryk er lavere end 8 Pa i SB-perioden, da øges nødvendige overtryksskabende luftmængde således at de 8 Pa opnås.

For beregning af energiforbruget opbygges en model i Excel, hvor alle energikrævende funktioner i ventilationsanlægget er repræsenteret beregningsmæssigt.

Som vist under afsnit omkring styringsprincipper, er der ikke 2 anlæg, der principmæssigt er ens opbygget.

Derfor udføres der en specifik beregningsmodel for hver enkelt OP-stue.

Input er aktuel opbygning af anlæg. Målinger, dataanalyser og CTS PI værdier.

Der simuleres et årsforbrug vha. af en simuleringsmodel i Excel med blokfunktion for varme, køl, varmegenvinding og recirkulering. Målte luftmængder indgår.

Beregningsmæssigt for modellen opdeles den i 2 scenarier opvarmning og køling, og dette både i Operation og Set Back modus. Dvs. minimum 4 simuleringer.

På de ventilationsanlæg, hvor der er en ekstra tidsperiode med en mellemfase inden SB-perioden, da bliver det således i alt 6 simuleringer, der gennemregnes for at opnå et opsummeret samlet årligt energiforbrug.

Input for opvarmnings- og kølesituationen er baseret på Design Reference Year. DRY.

DRY er en vejrdatabase udviklet af DMI med vejrdata på timebasis. Vejrdata der bruges til simulering af bygningers energiforbrug og termiske indeklima, det såkaldte Design Reference Year, DRY, er indsamlet i perioden 1975-1989 (Jensen og Lund fra DTU), og senere fra 1996 til 2010 (DRY13) af Rode og Dragsted.

Statiske motor for udtræk var etableret for DRY, og er de vejrdata, der er benyttet. Data er fælles for alle OP-stuer og dermed den procentvise ændring retvisende.

Setpunktstemperaturen for indblæsningen på hovedanlægget afgør skillelinjen mellem opvarmnings- og kølesæsonen og de dermed afledte driftstimer, de indeholder med tilhørende gennemsnitstemperaturer i deres respektive intervaller.

I Level 2 da ændres luftmængder og luftmængdeforholdet mellem indblæsning og udsugning. Dette påvirker temperaturvirkningsgraden, og dette korrigeres der med genberegning af temperaturvirkningsgraden.

Effektoptaget til ventilatorerne påvirkes ligeså.

Nye effektoptag beregnes vha. modellovene for ventilatorer med tilpasset eksponent relateret til de aktuelle styringsprincipper.

Det samlede energiforbrug kan opsummeres.

Dette udføres for alle 3 scenarier, As is, Level 1 og Level 2, og dermed kan udviklingen i energiforbruget analyseres, og sættes i forhold til hinanden og de bakteriologiske forhold.

Afslutningsvis beregnes og analyseres den nødvendige luftmængde filtreret luft for overholdelse af CFU-krav ≤ 10 pr. m^3 i relation til antal personer på stuen og deres påklædning.

Statistisk analyse

Der er anvendt anerkendte statistiske analysemetoder. For detaljer se Appendix.

7 Principper og opbygning af ventilationsanlæg på de inkluderede hospitaler

Diversiteten er vist på de efterfølgende slides. Der er ikke to stuer, der detailmæssigt er ens opbygget eller med samme styringsprincip.

Der er dog nogle fællestræk, der er oplistet i nedenstående skema.

Hospital Anonym	Type	Ventilationsanlæg		LAF-del. Ventilatorer		TAF sekundær anlæg
		Centralt	Decentralt	Internt	Externt	
A	LAF		x		x	
B	LAF	x		x		
C	LAF	x			x	
D	LAF		x	x		
E	LAF		x		x	
F	LAF	x			x	
G	LAF		x		x	
H	LAF	x		x		
L	LAF	x		x		
M	LAF	x	x	x		
N	LAF	x		x		
P	LAF		x		x	
I	TAF		x			
J	TAF	x				x
K	TAF	x				x
O	TAF	x				
Q	TAF	x				

Figur 27: Skema for styringsprincip.

Med centralt anlæg forstås at hovedventilationsanlægget, der leverer udeluft til OP-stuen, også betjener øvrige OP-stuer, rum eller zoner.

Decentralt anlæg er, hvor et ventilationsanlæg er dedikeret til en OP-stue.

LAF-enhedens ventilatorer. Er de placeret i LAF enheden på stuen, er de interne. Eksternt er, hvis de er placeret udenfor OP-stuen.

TAF sekundært anlæg er hvor, der foruden fællesanlægget, er separat ventilationsanlæg placeret efter fællesanlægget for betjening OP-stue (-rne, birum mv.) For J, K's vedkommende er det et fælles anlæg for disse 2 OP-stuer.

Se de efterfølgende principskitser for hver enkelt OP-stue.

Fælles for alle 17 OP-stuer er, at indblæsningsluftmængden holdes konstant. Dette værende sig udeluft eller den samlede indblæsningsluftmængde inkl. recirkulation.

Dermed er der sikkerhed for, at de dimensionerende forhold omkring luftskifte, lufthastigheder og luftstrømninger altid overholdes, og som ligger til grund for OP-stuens godkendte renhedsklassificering. Dermed sikring af de mikrobiologiske forhold.

Den konstante luftmængde, CAV, fastholdes enten ved konstant tryk, vha. volustater eller VAV- Terminaler.

Ventilatorer er frekvensregulerede gældende for alle OP-stuer.

Overtrykket på OP-stuen opnås vha. et luftoverskud, der er en differens mellem indblæsningen af udeluft og afkast til det fri.

Reguleres ved at variere udsugningsluftmængden (indblæsningsluftmængden er konstant), og dermed ændres luftoverskuddet.

Ved indbygget recirkulering i anlægget (ikke LAF-delen), er det andelen af recirkuleringsluft, der ændres og dermed opnås en differens mellem udeluft og afkast luft.

Den overskydende luftmængde eksfiltreres fra OP-stuen mod de lavereliggende trykområder, rum, gennem lækageåbninger eller deciderede dimensionerede overtryksåbninger.

Tryktabet for luftmængden af denne eksfiltrering gennem dette lækageareal (konstant) definerer størrelsen på overtrykket på OP-stuen.

Lufthastigheden og dermed luftmængden gennem dugen i LAF-delen skal være konstant under operationen.

Primært opnås dette ved at måle differenstrykket over LAF-dugen og regulerer efter dette. Da LAF-dugen er placeret efter HEPA filtre i LAF-delen, vil lufthastighed holdes konstant, selvom tryktabet over HEPA-filtrene øges med tiden (år) pga. partikelophobning i filtermaterialet.

Der er udført regressionsanalyse med input fra tabel på foregående side, sammenholdt med både det eksisterende energiforbrug, det optimerede energiforbrug og energibesparelsen. Variablerne i skemaet er ikke signifikante.

Der er andre flere betydende variabler, berørende på opbygningen af ventilationssystemet, tryktabsmæssige forhold, ventilatortype, indbygningsforhold, luftmængder, temperatursetpunkter etc.

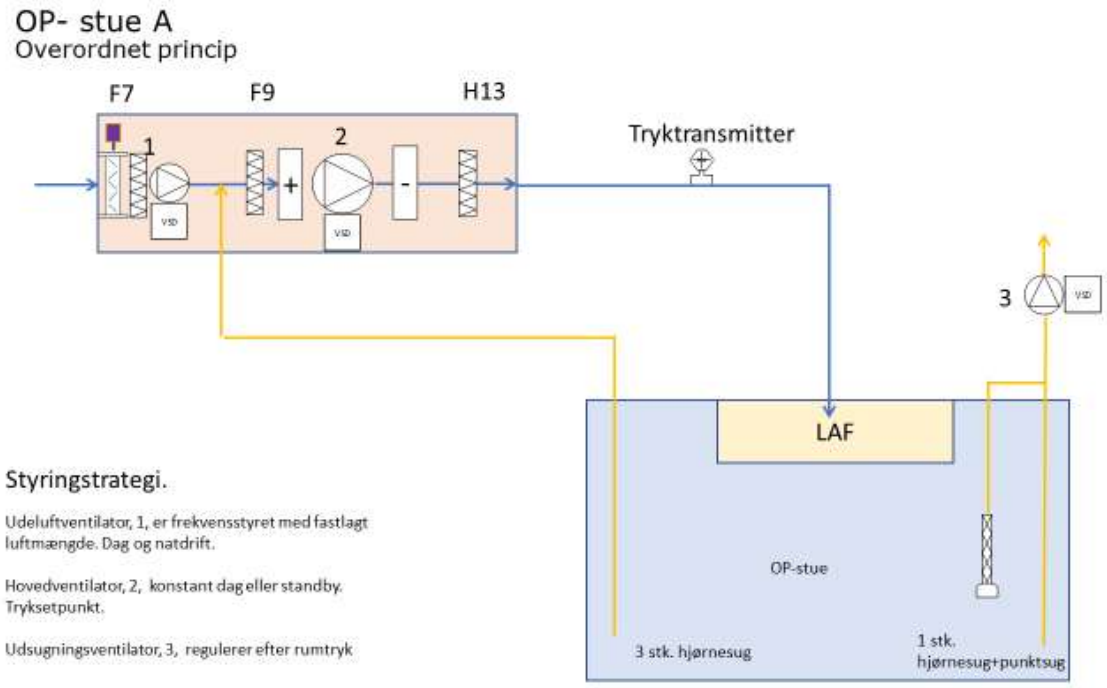
8 Styringsstrategi for de enkelte ventilationsanlæg

Nedenfor er de enkelte OP-stuers ventilationsmæssige opbygning med tilhørende overordnede styringsprincip beskrevet.

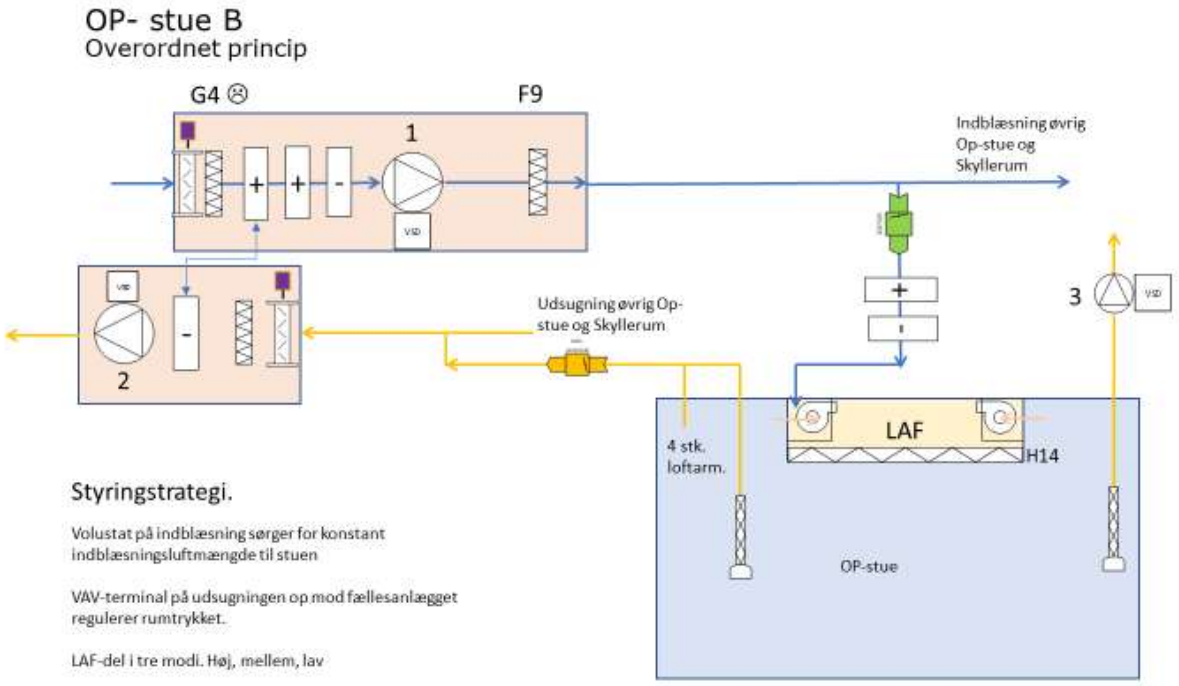
Flere detaljer fremkommer i bilag 5 for de enkelte operationsstuer.

Yderst sjældent var der funktionsbeskrivelser omkring reguleringsprincippet for automatikken/CTS'en.

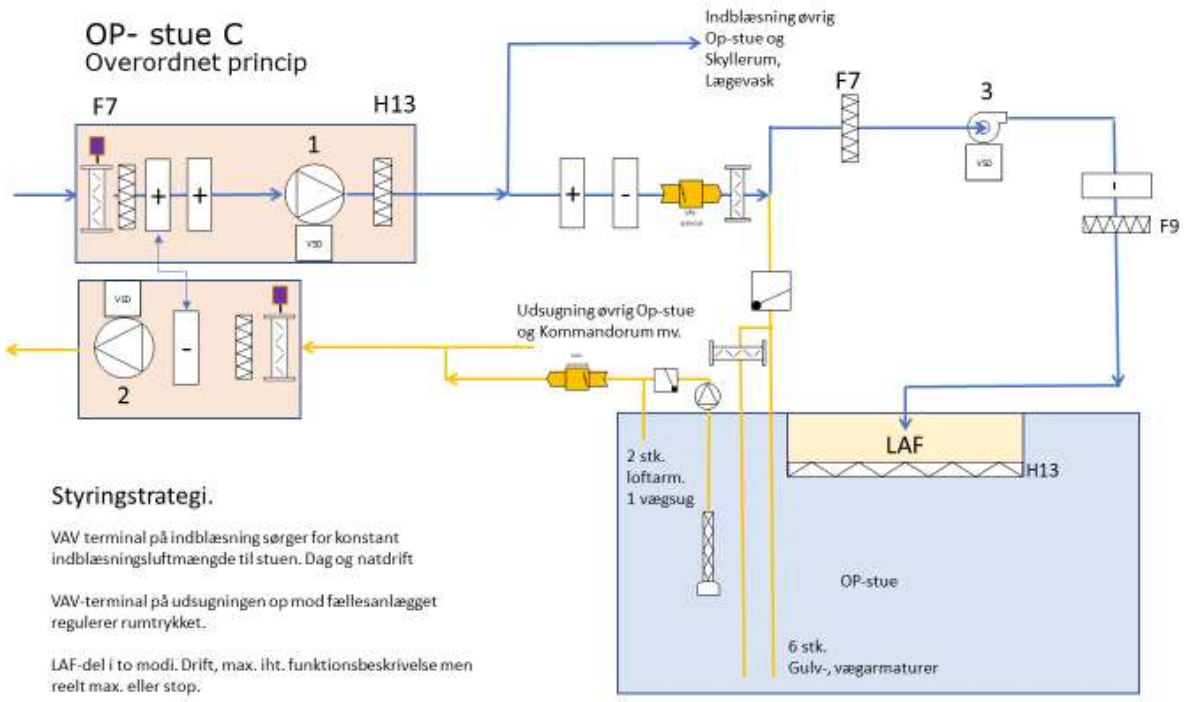
Således er styringsstrategien beskrevet ud fra best practice i relation til de styringskomponenter, der indgår i reguleringssystemet og vist på CTS PI diagrammet.



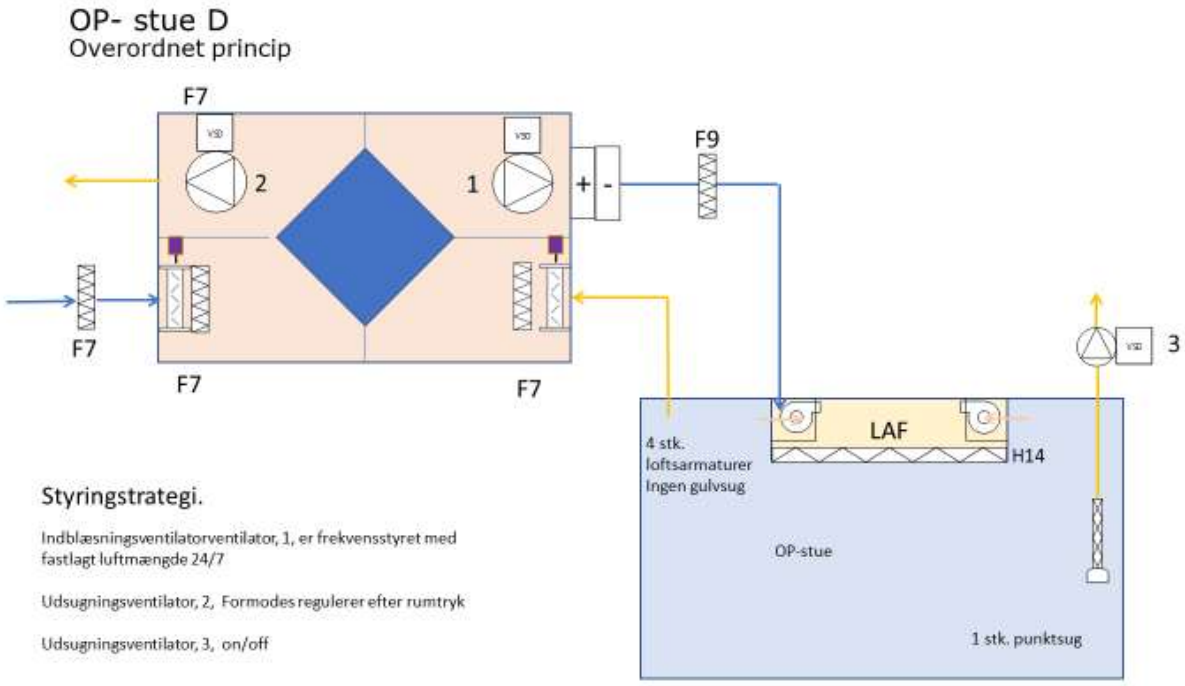
Figur 28: Beskrivelse af OP-stue A's ventilationsmæssige opbygning.



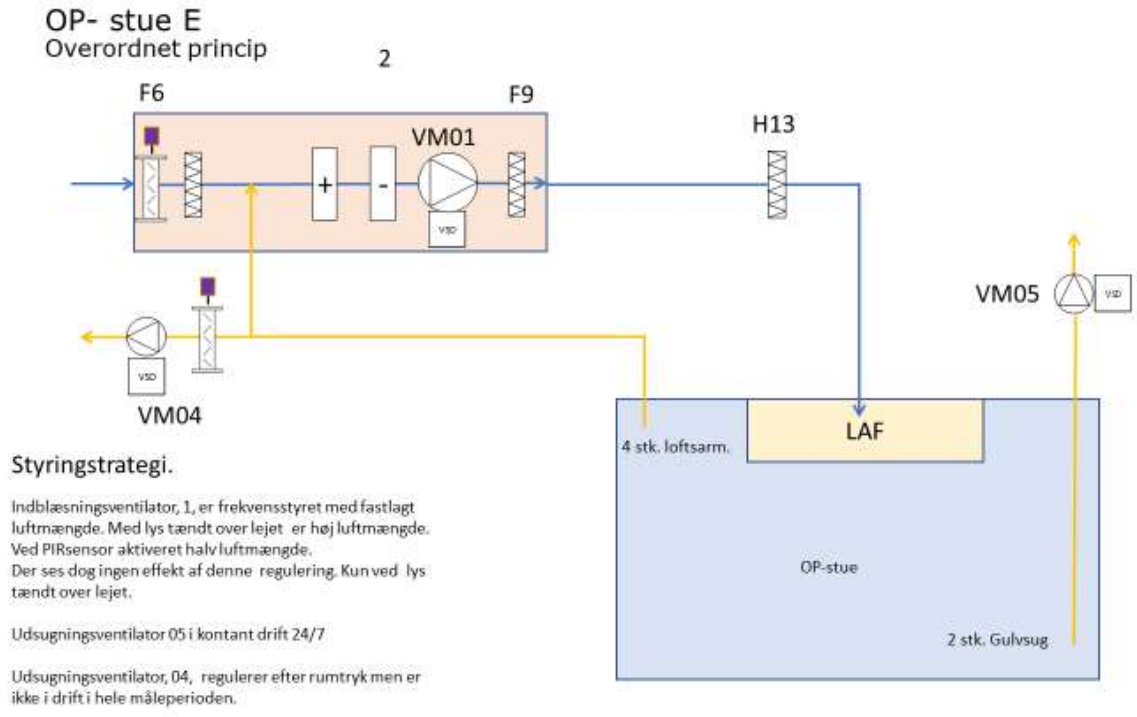
Figur 29: Beskrivelse af OP-stue B's ventilationsmæssige opbygning.



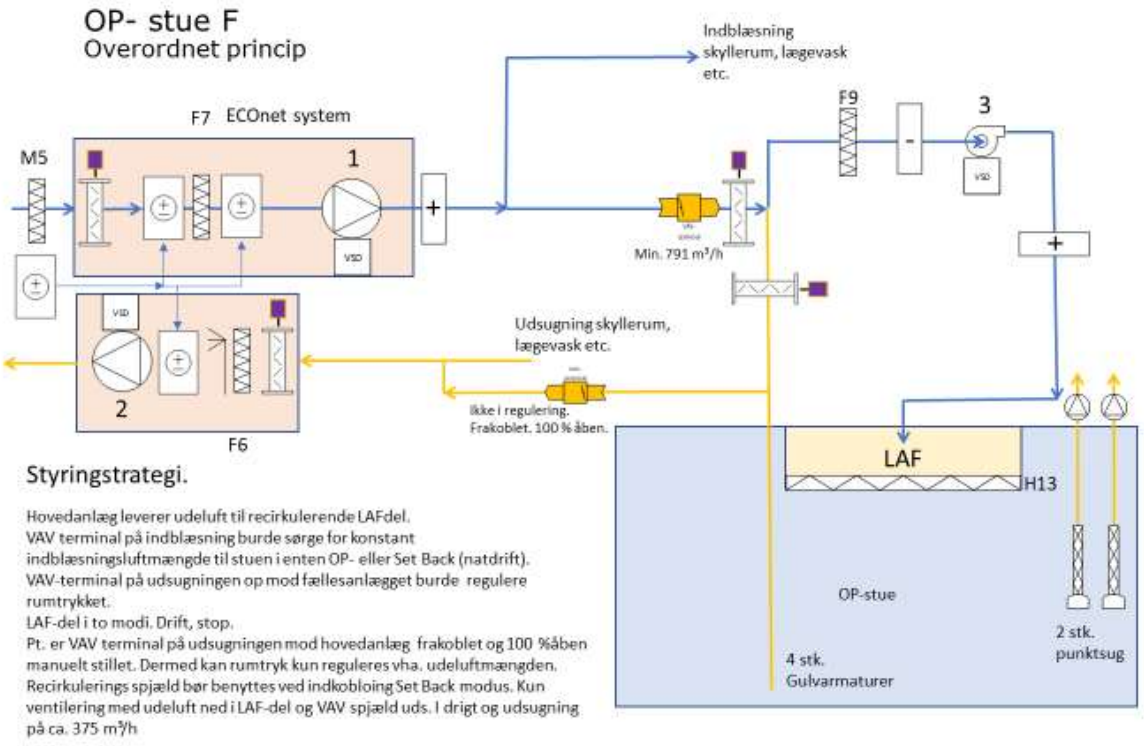
Figur 30: Beskrivelse af OP-stue C's ventilationsmæssige opbygning.



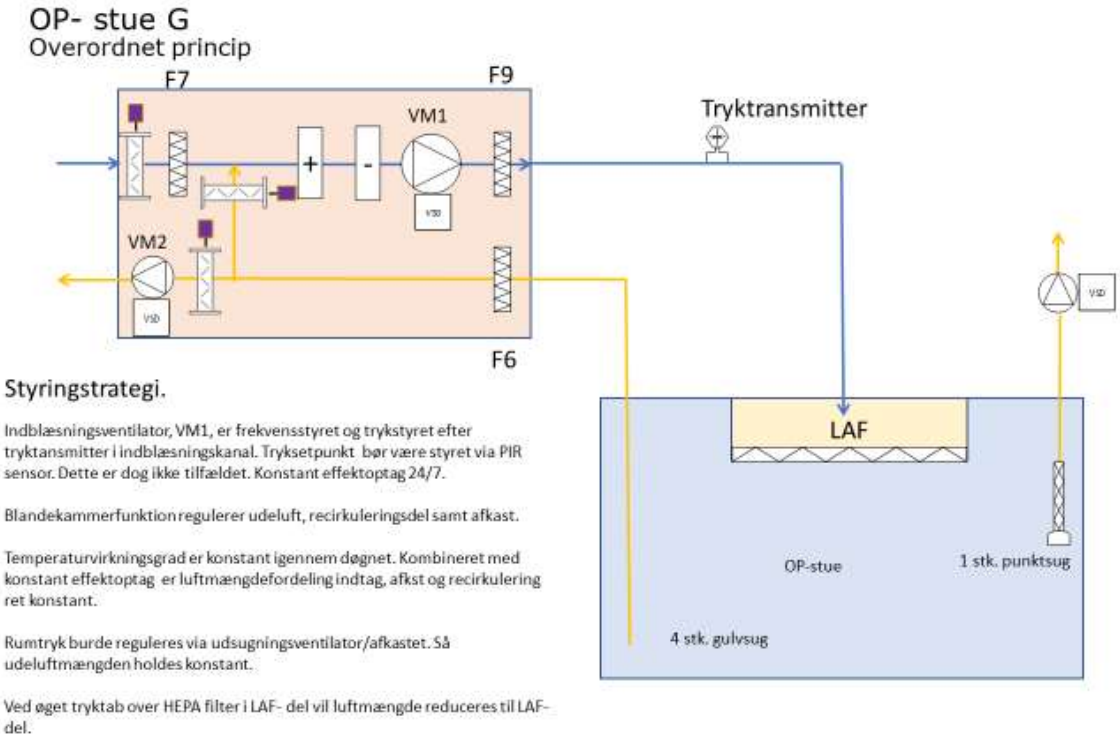
Figur 31: Beskrivelse af OP-stue D's ventilationsmæssige opbygning.



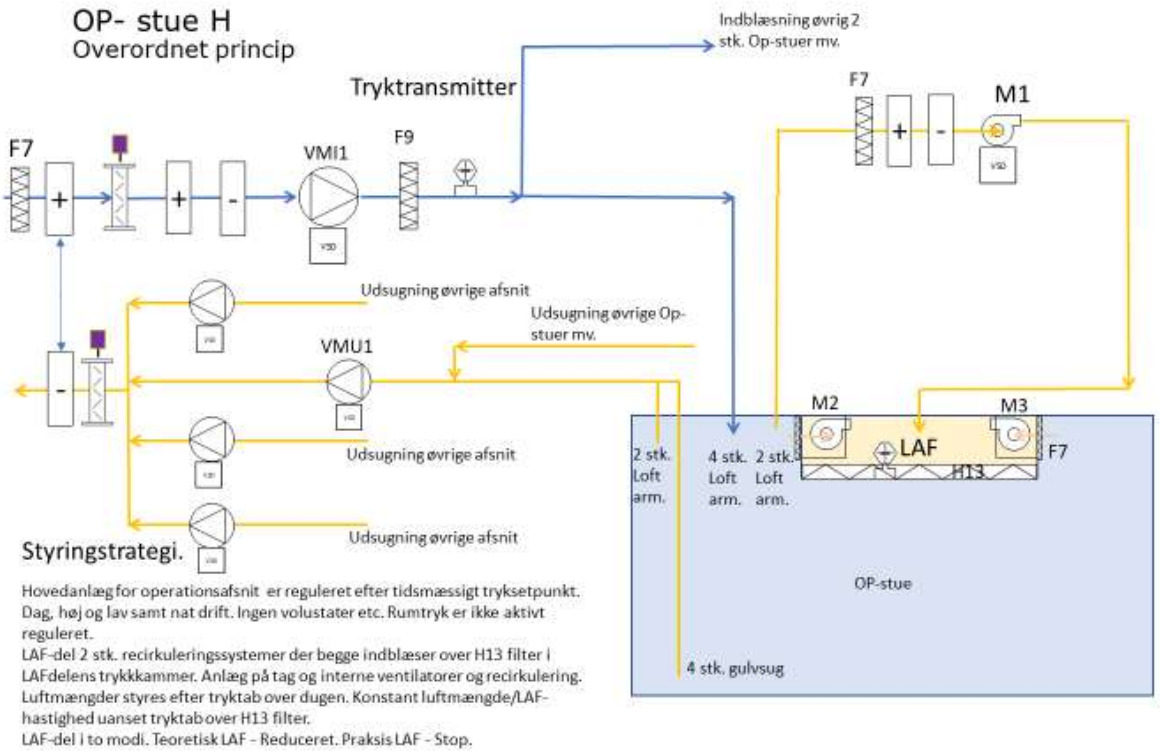
Figur 32: Beskrivelse af OP-stue E's ventilationsmæssige opbygning.



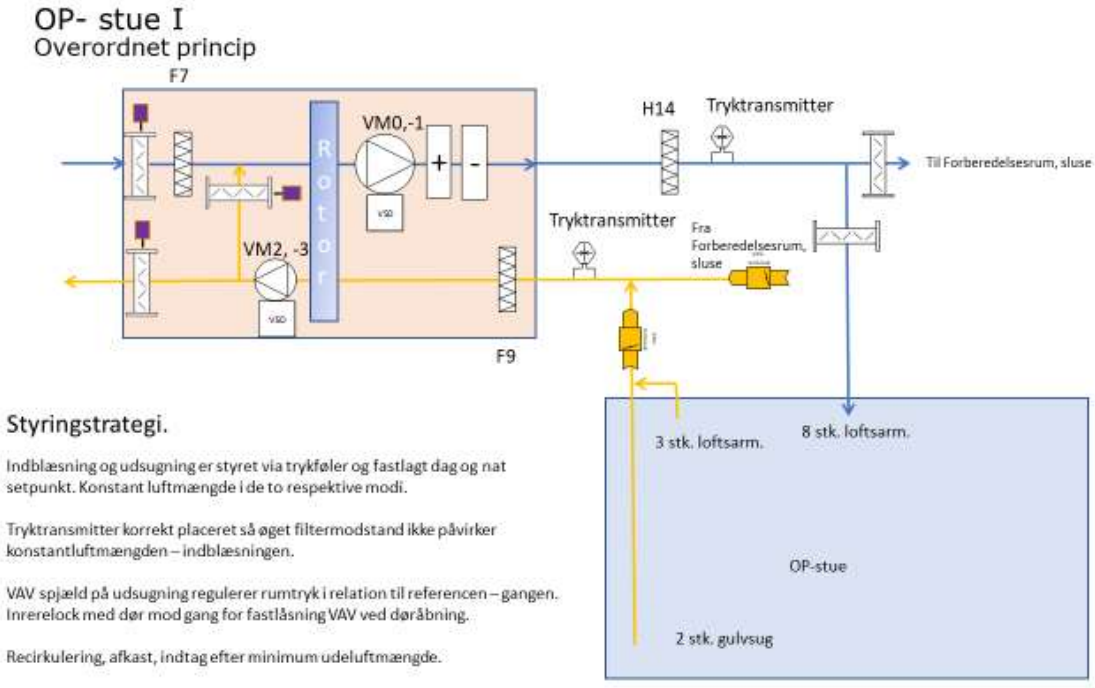
Figur 33: Beskrivelse af OP-stue F's ventilationsmæssige opbygning.



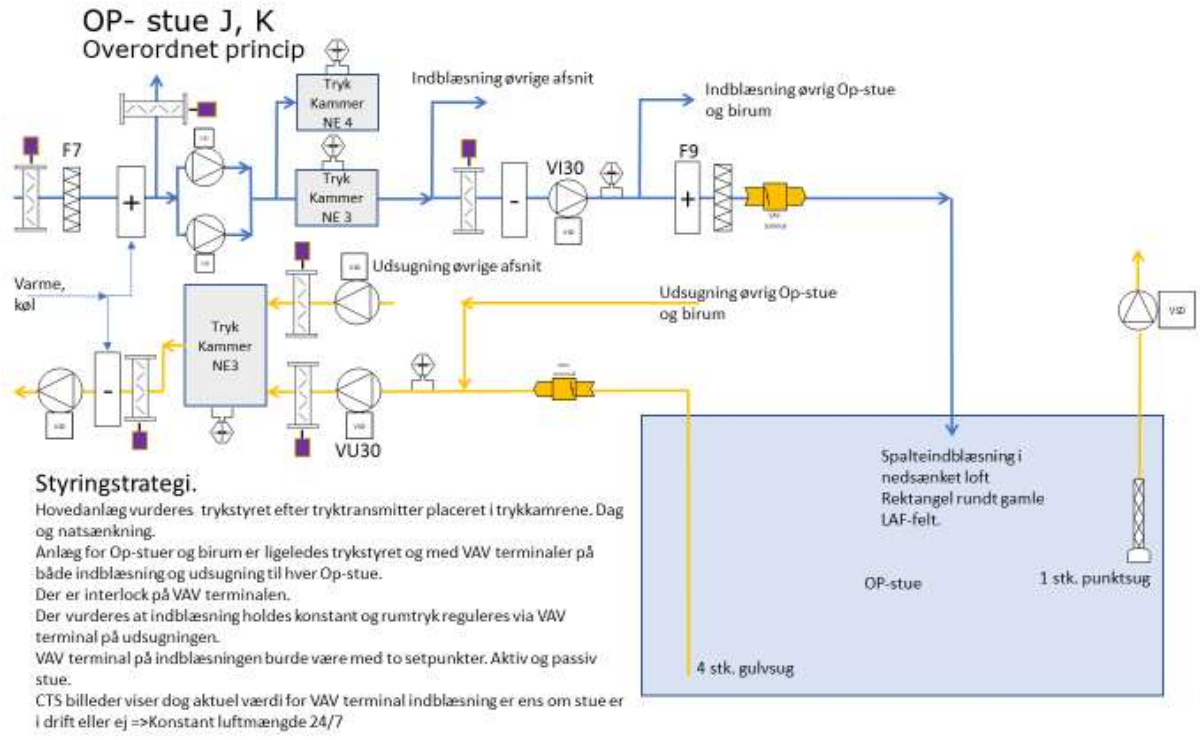
Figur 34: Beskrivelse af OP-stue G's ventilationsmæssige opbygning.



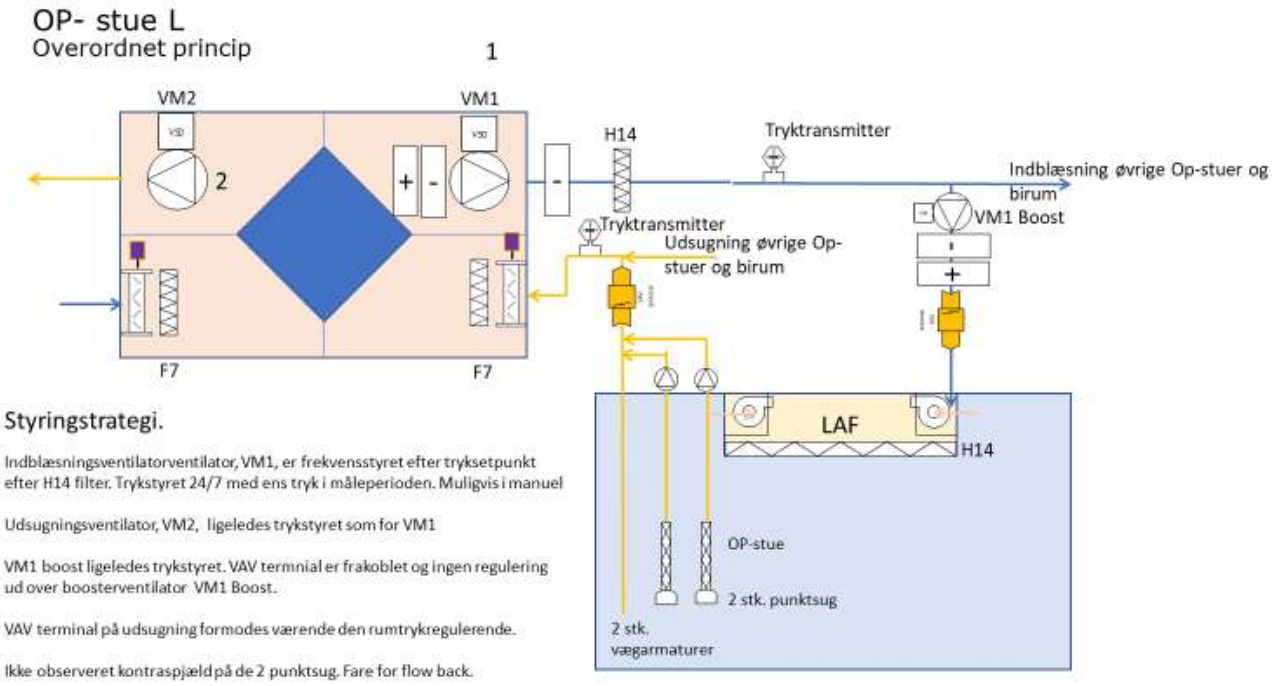
Figur 35: Beskrivelse af OP-stue H's ventilationsmæssige opbygning.



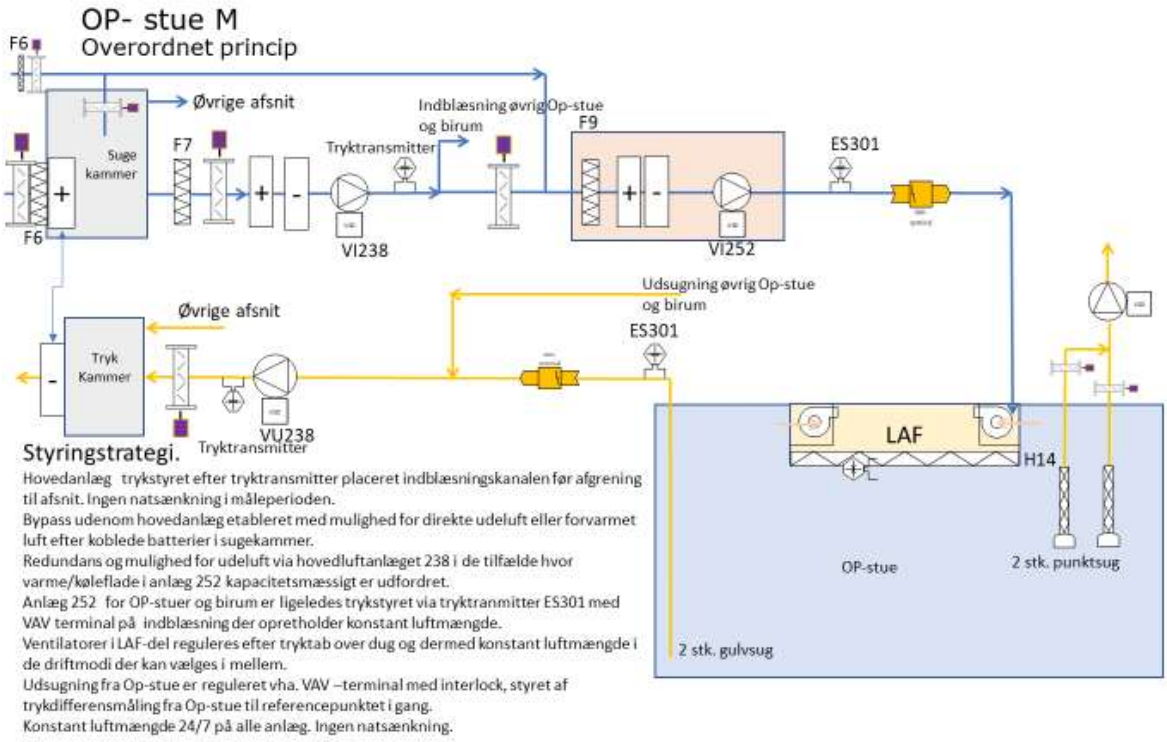
Figur 36: Beskrivelse af OP-stue I's ventilationsmæssige opbygning.



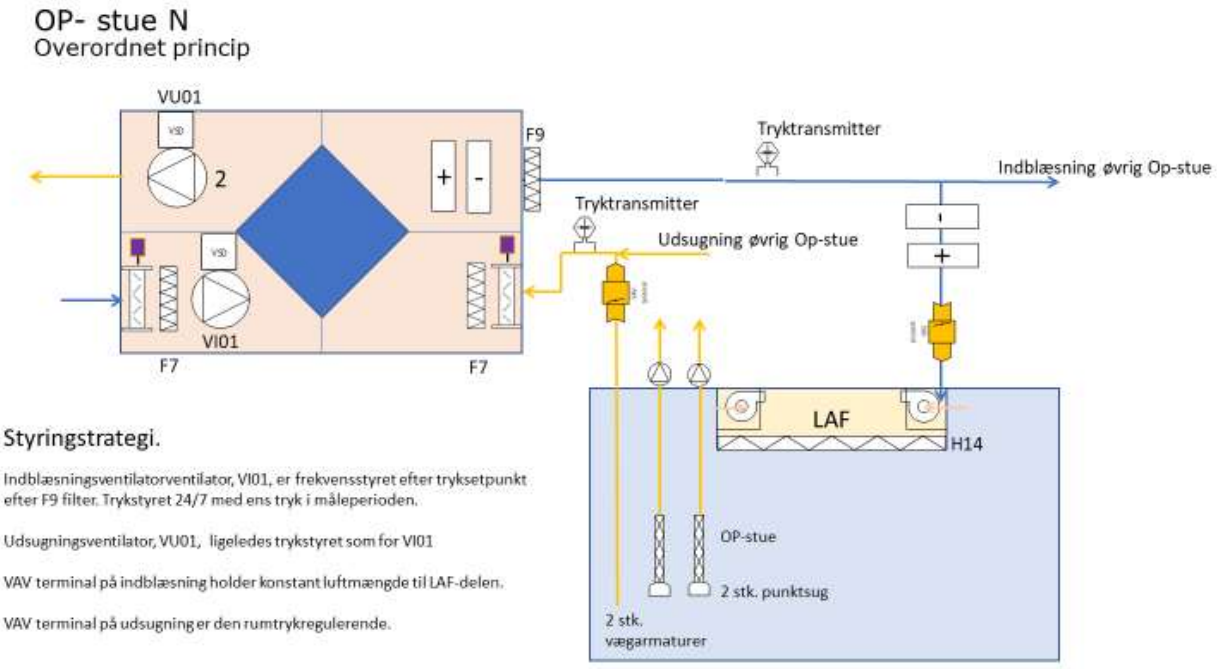
Figur 37: Beskrivelse af OP-stue J og K's ventilationsmæssige opbygning.



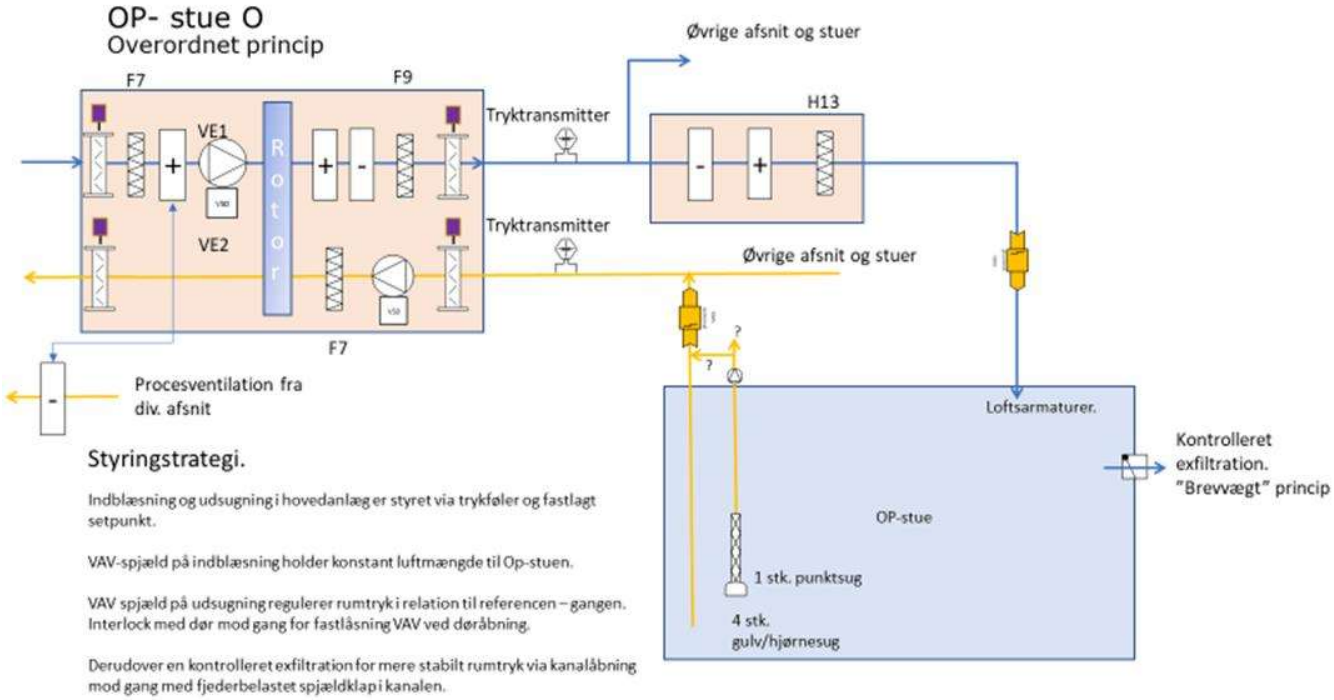
Figur 38: Beskrivelse af OP-stue L's ventilationsmæssige opbygning.



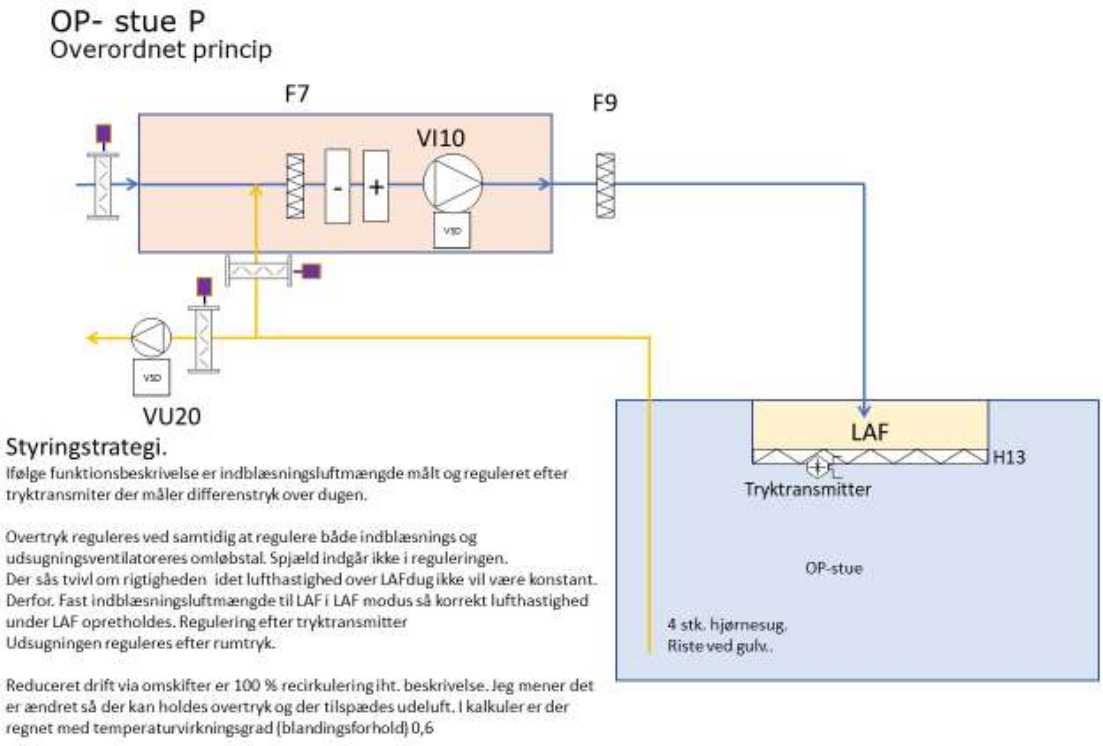
Figur 39: Beskrivelse af OP-stue M's ventilationsmæssige opbygning.



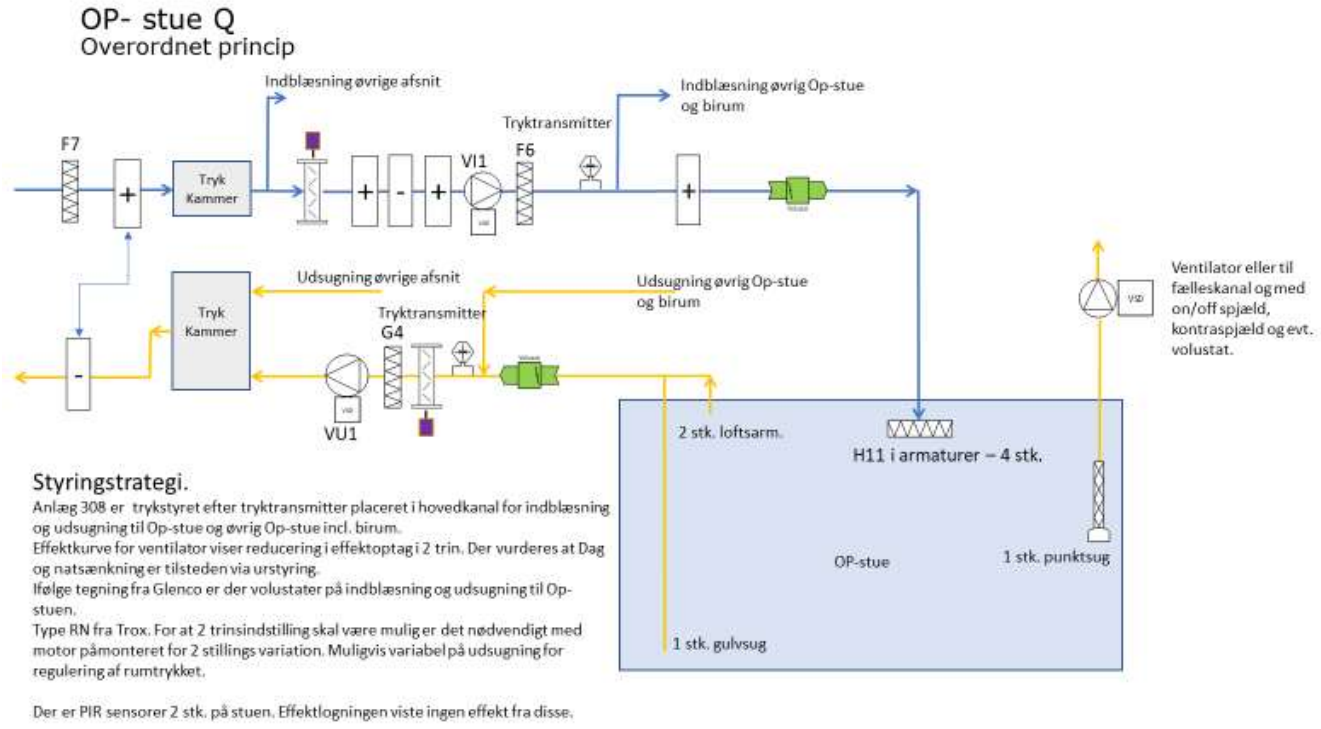
Figur 40: Beskrivelse af OP-stue N's ventilationsmæssige opbygning.



Figur 41: Beskrivelse af OP-stue O's ventilationsmæssige opbygning.



Figur.42: Beskrivelse af OP-stue P's ventilationsmæssige opbygning



Figur.43: Beskrivelse af OP-stue Q's ventilationsmæssige opbygning

9 Resultater

Operationsstuerne

Som det er anført under design, indgik i alt 15 hospitaler i undersøgelsen. De bidrog med i alt 17 operationsstuer og samlet 51 hofte- eller knæprotese-operationer. 35 operationer blev udført i 12 operationsstuer udstyret med LAF-ventilation og 16 operationer udført på 5 operationsstuer med TAF-ventilation.

Alle operationsstuer anvendes til dagligt på de respektive afdelinger med gennemførelse af kunstige hofte- og knæoperationer.

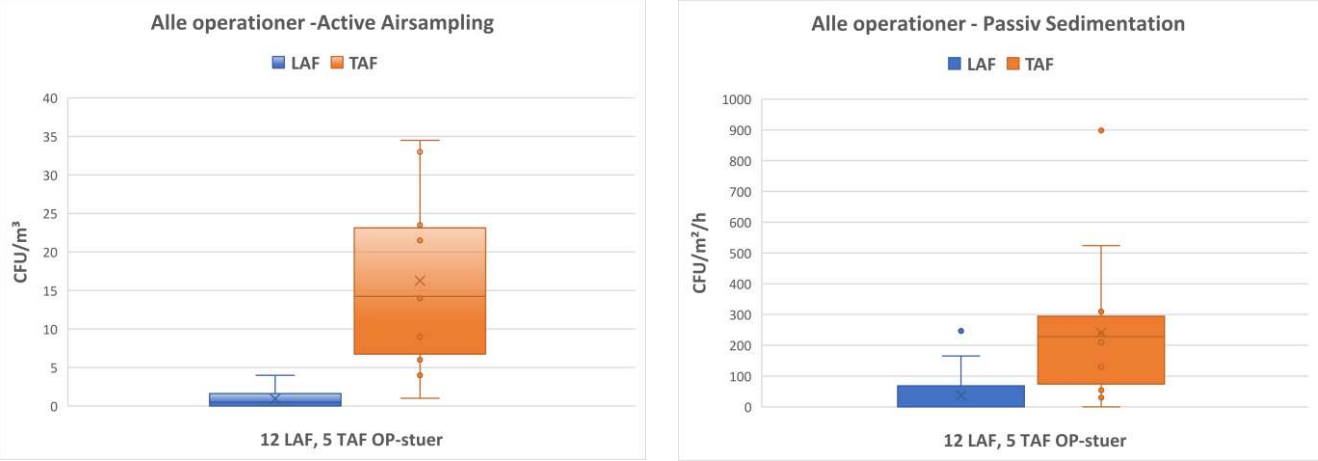
Tre af de inkluderede operationsstuer (TAF) opfyldte ikke ISO-klassificering 5 i "At Rest", i hvile. Den ene opfyldte ISO -klassificeringen 7, og to operationsstuer på samme hospital havde ikke data for partikeltest, men airsampling, CFU-måling, på OP-stuerne "At rest".

En operation blev udeladt på LAF-stue Hospital B pga. utilsigtet driftsudfald på udsugningsventilator for OP-stuen under operationen.

LAF- vs. TAF-ventilation og forekomst af CFU

Både aktiv air-sampling (p <0,001) og passiv bakteriel sedimentation (p <0,001) havde samlet lavere CFU -tal i LAF-operationsstuer sammenlignet med TAF-ventilerede operationsstuer (tabel I og figur).

Alle aktive prøver indsamlet i LAF operationsstuer viste resultater indenfor den anbefalede tærskelværdi på 10 CFU/m^3 (tabel I). Ved 9 ud af de 16 (56,3 %) operationer udført i TAF-operationsstuer var denne tærskelværdi overskredet.



Figur 44: Box Plot. Forekomst af CFU for alle operationer, TAF og LAF.

Måling på operationsstuerne

Med hensyn til de tekniske parametre viste vores resultater, at for hver 1 m^3 stigning i operationsstue-volumen faldt de aktive CFU-tal signifikant med 2,4 % (p-værdi <0,05), mens alle andre variable blev holdt konstant. Vores resultater forudsagde også, at for hver 1 samlet stigning af luftskifte pr. time faldt de aktive CFU-tal signifikant med 2,4 % (p-værdi <0,05). De samme variable forudsagde ingen signifikant effekt på de passive CFU-tal.

Der blev ikke fundet en statistisk signifikant sammenhæng mellem aktivt eller passivt CFU-tal og LAF-hastighed.

Med hensyn til antal personer på operationsstuen og varigheden af operationer, var der ingen forskel i medianværdien i de forskellige situationer (tabel I). Ift. døråbninger, var det mindste antal samlede åbninger 0 for både LAF og TAF, og maksimum antal blev 13 observeret på en stue (tabel nedenfor).

Vores resultater viste, at hverken antallet af medarbejdere eller antallet af samlede åbninger havde en betydelig indvirkning på CFU-antallet.

I tomme operationsstuer blev en medianværdi på 0 og 1 CFU/m^3 fundet i henholdsvis LAF- og TAF-operationsstuer (tabel I). Specifikationerne for ventilationssystemerne er præsenteret i et efterfølgende tillæg A (tabel A.1) og filteregenskaberne i tillæg B (tabel B.1.)

Tabel 1: Karakteristika af operationsstuerne ift. typen af ventilationssystem. 95 % KI, 95 % konfidensinterval.

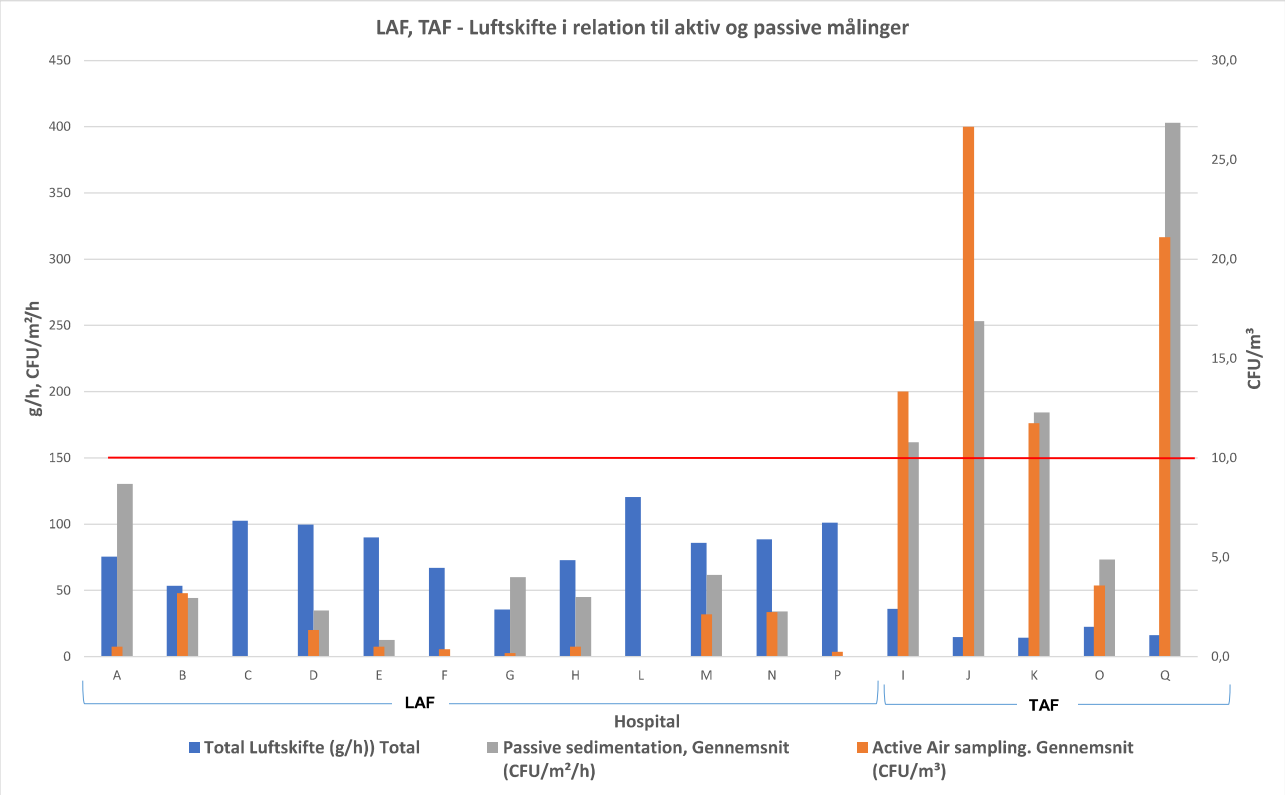
		Median	95 % KI	Range
	Tom [CFU/m^3]	0	-0,52-2,18	0-7
	Active air sampling [CFU/m^3]	0,5	0,51-1,37	0-4
	Passiv sedimentation [CFU/m^2/t]	0	16,12-58,34	0-246,6
	Operationstid [min]	59,5	56,79-65,80	44-95
	Antal personale	7	7,19-7,81	7-10
LAF	Antal totale åbninger	1	1,33-3,55	0-13
	Volumen [m^3]	128,5	115,63-154,04	99-187
	Totalt luftskifte per time [antal/t]	87	68,64-97,86	36-120
	Maksimalt positivt tryk [Pa]	13,85	9,29-18,71	1,6-28
	LAF hastighed [m/s]	0,34	0,27-0,36	0,18-0,41
	LAF areal [m^2]	9	7,96-9,88	6,01-10,88
	Tom [CFU/m^3]	1	-0,32-2,52	0-2,5
	Active air sampling [CFU/m^3]	14,25	10,34-22,16	1-34,5
	Passiv sedimentation [CFU/m^2/t]	228,59	123,68-357,18	0-898,2
	Operationstid [min]	59	50,39-71,98	35-105
TAF	Antal personale	8	7,2-8,1	7-10
	Antal totale åbninger	2	0,97-3,15	0-7
	Volumen [m^3]	134	116,3-165,62	122-173
	Totalt luftskifte per time [antal/t]	16	9,37-32,23	14-36
	Maksimalt positivt tryk [Pa]	16,7	7,23-24,65	7,5-26

Figur 45: Tabel 1: Karakteristika af operationsstuerne ift. typen af ventilationssystem

9.1 Korrelation imellem luftskifte og CFU fordelt på LAF og TAF

Antal luftskifte samt aktive og passive mikrobiologiske målinger

Rød linje CFU krav ≤0 CFU/m³



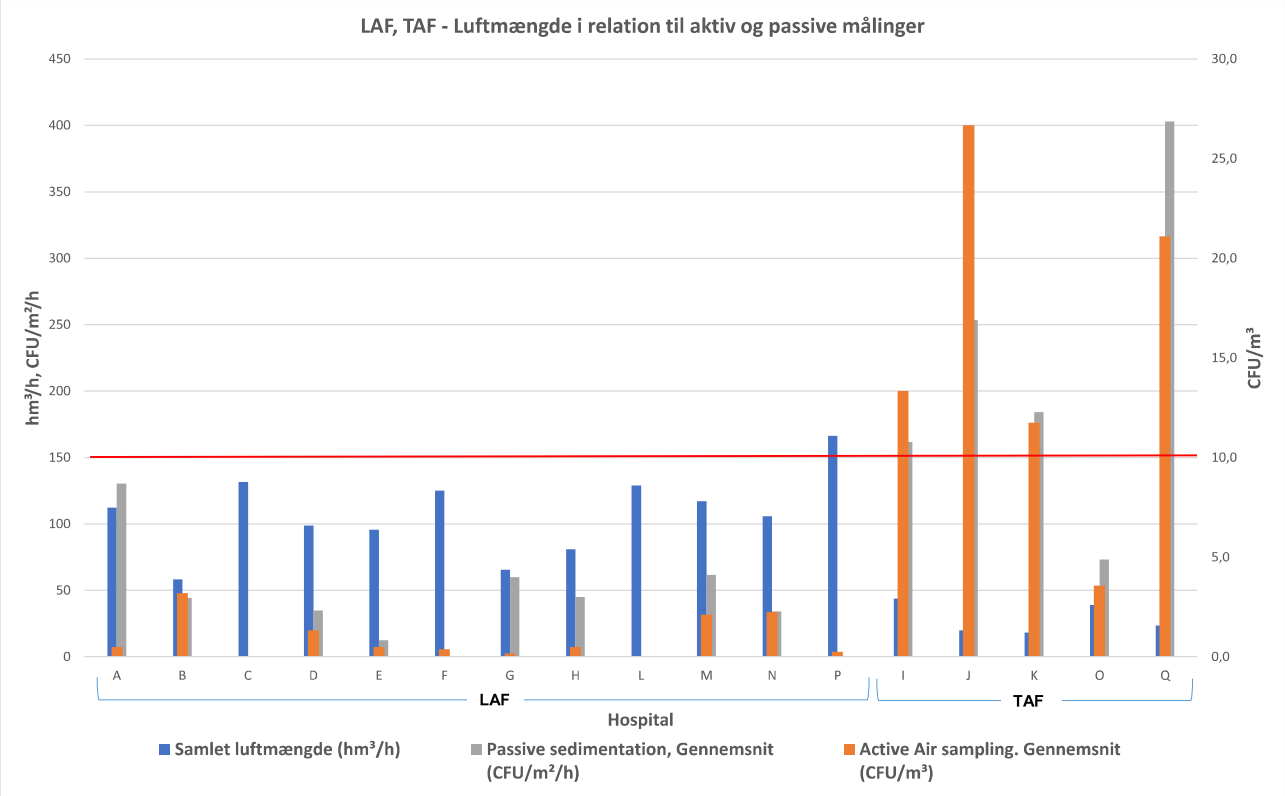
Figur 46: Antal luftskifte samt aktive og passive mikrobiologiske målinger.

Der ses, at et stort luftskifte, høj luftmængde, i forhold til rumvolumen, medfører lavere CFU/m³ og CFU/m² pr. h.
Hospital A skiller sig ud på den passive sedimentation, der er høj. Iht. observationerne på stuen, var der høj aktivitet med mange dør og åbninger af gennemstiksskabe. Det er en mulig faktor, der kan have påvirket resultatet.

Hospital I har en høj CFU, selv om det er den TAF-stue der har det største luftskifte. Generelt lå mikrobiologiske målinger på niveau med O, men et enkelt airsample resultat lå meget over grænseværdien på 10 CFU/m³ og øger gennemsnittet. Det viser måske en nedsat robusthed ved TAF-stuen.

Luftmængde samt aktive, og passive mikrobiologiske målinger

Rød linje CFU krav ≤0 CFU/m³

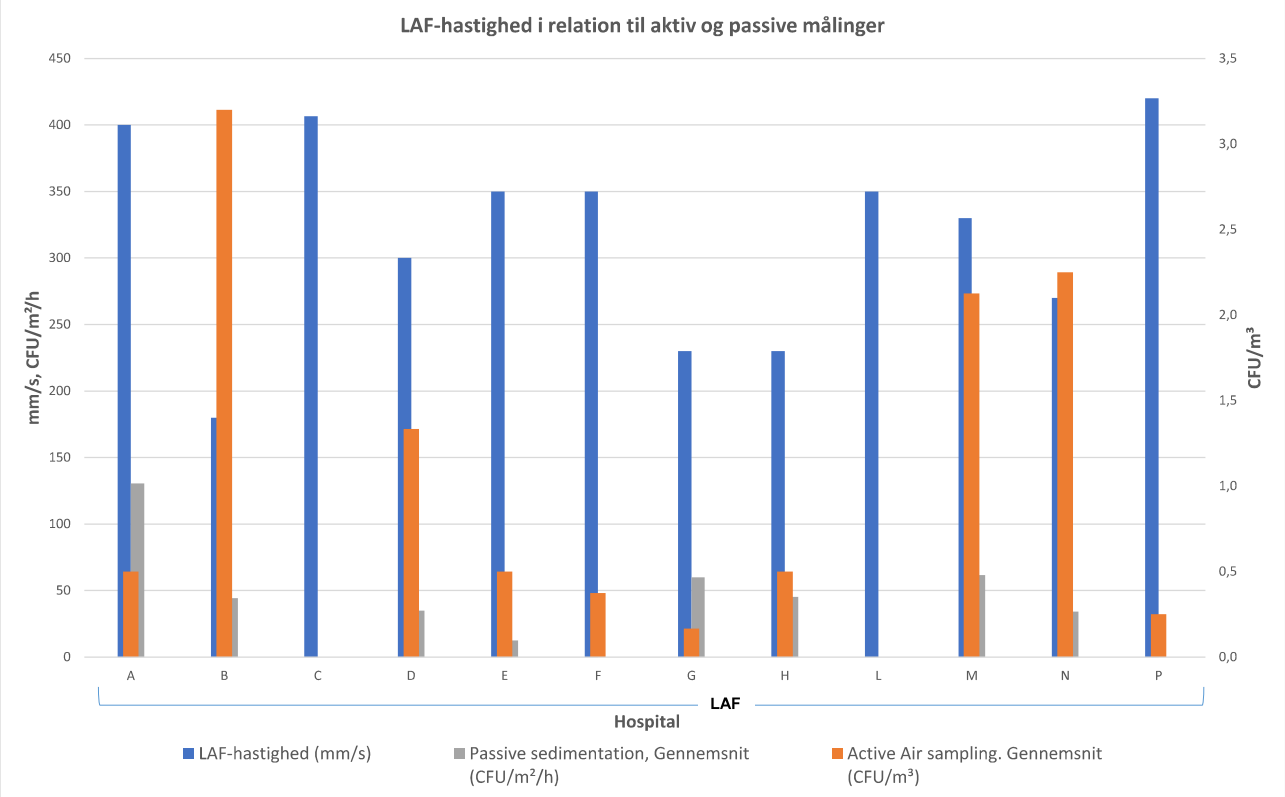


Figur 47: Luftmængde samt aktive, og passive mikrobiologiske målinger.

Luftmængdens størrelse har en effekt på de mikrobiologiske forhold, som bekræftet ved luftskifteforholdet.

Der er undersøgt indflydelsen af indblæsningsluftmængden af filteret ultraren luft ind på OP-stuen i forhold til antal personer og deres påklædning, samt om 2 ekstra personer på OP-stuen under målinger kan have bidraget til en overskridelse af CFU-kravet ≤10. Se bilag 2 for udførlig beregning og metode.

LAF-hastighed og samt aktive og passive mikrobiologiske målinger



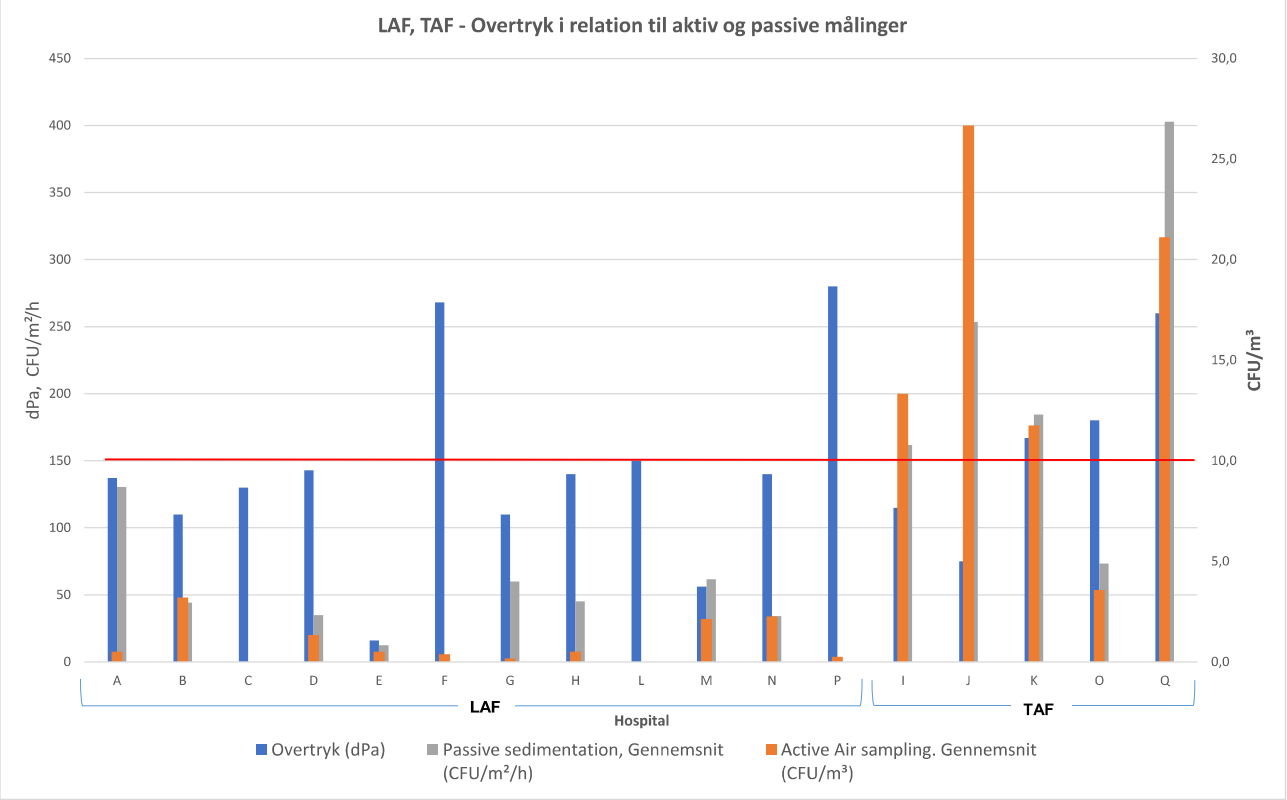
Figur 48: LAF-hastighed og samt aktive og passive mikrobiologiske målinger.

Der ses, at høj LAF-hastighed umiddelbart ikke har haft indflydelse på lav CFU/m³.

Eksempelvis hospital A og H ligger ens mht. CFU tal, men LAF-hastighed er 0,4 m/s for A og 0,23 m/s for H. Der er andre faktorer, der kan have indvirkning, som kunne være OP-lampernes placering og vinkling over OP-lejet, operatøren eller evt. undertemperatur på den indblæste luft gennem LAF-delen.

Jo lavere indblæsningstemperatur i forhold til rumtemperaturen, desto højere vil laminare lufthastighed være ved OP-lejet grundet tyngdekraftens indvirkning på den tungere massefylde af den koldere laminare luftstrøm.

Overtryk på OP-stue amt aktive og passive mikrobiologiske målinger



Figur 49: Overtryk på OP-stue amt aktive og passive mikrobiologiske målinger.

For TAF-stuernes vedkommende er der målt høje overtryk specielt for hospital J og Q.

Aktiv airsampling viser dog her høje overskridelser af CFU-kravet. Som før anført, er det her, den primære faktor -den lave værdi for filtreret indblæst luftmængde.

For LAF stuernes ses, at selv ved lave overtryk på kun 2-5 Pa, opnås meget lave CFU-tal. (E og M).

LAF-princippet er et robust system. Den ultrarene luft er centreret ved OP-lejet, og luftstrømmen er ned over patienten og dernæst væk fra OP-lejet.

Stor sikkerhed for at partikler i rummet udenfor LAF-zonen ikke penetrerer denne luftmæssige barriere.

9.2 CFU'er og adfærd på operationsstuer

Specifikke målinger på de enkelte hospitaler fremgår af tabellerne nedenfor.

Det mindste antal samlede åbninger var 0 for begge typer operationsstuer, og det maksimale antal var 13 observeret i LAF operationsstuer (tabel x,y).

Som anført i de samlede tal ovenfor, var der ingen sammenhæng i antal personer og åbninger på stuerne.

Tabel LAF. Adfærd på operationsstuen (dør og kabinet åbningen, antal på stuen, udskiftning af personale)

Hospital	Operation	Aktiv slit sample måling	Passiv sedimentation måling	Operationstid	Personer på OP-stuen	Antal i steril	Døråbninger	Gennemstikskabs åbninger
	Nr.	[CFU/m³]	[CFU/m²/h]	[min]	Antal under operationstid	Antal under operationstid	Antal under operationstid	Antal under operationstid
Laminar airflow - LAF								
A	1	0,5	157,2	80	7	4	5	8
	2	1	68,3	46	7	4	0	2
	3	0	165,5	95	7	4	0	2
B	~~1~~	~~9~~	~~41.4~~	~~76~~	~~8~~	~~4~~	~~0~~	~~4~~
	2	2	91,1	69	10	4	1	5
	3	3,5	0	59	10	4	0	2
C	1	2,5	0	63	7	4	0	1
	2	0	0	68	7	4	0	0
	3	0	0	50	7	4	0	2
D	1	0	0	60	8	4	0	4
	2	2,5	0	53	8	4	0	3
	3	1,5	116,4	54	7	4	0	3
E	1	1	0	49	8	4	0	1
	2	0	0	67	9	4	3	4
	3	0,5	37,4	84	9	4	4	1
F	1	0,5	0	50	7	4	0	0
	2	0	0	55	7	4	0	0
	3	0	0	62	8	4	1	2
	4	1	0	57	7	4	0	0
G	1	0	87,3	72	7	4	0	0
	2	0	92,5	68	7	4	0	0
	3	0,5	0	54	7	4	0	0
H	1	1,5	52,4	60	7	4	9	1
	2	0	37,9	83	7	4	5	2
	3	0	44,9	70	7	4	5	1
L	1	0	0	87	7	4	0	1
	2	0	0	60	7	4	0	0
M	1	0	0	45	7	4	0	0
	2	2,5	0	54	7	4	0	1
	3	4	0	63	7	4	0	1
	4	2	246,6	51	7	4	3	0
N	1	0,5	0	44	7	4	0	0
	2	4	68,3	46	7	4	0	0
P	1	0	0	56	8	4	0	0
	2	0,5	0	50	9	5	0	0

Figur 50: Tabel LAF - Adfærd på operationsstuen.

Tabel TAF: Adfærd på operationsstuen (dør og kabinet åbningen, antal på stuen, udskiftning af personale)

Hospital	Operation	Aktiv slit sample måling	Passiv sedimentation måling	Operationstid	Personer på OP-stuen	Antal i steril	Døråbninger	Gennemstikskabs åbninger
	Nr.	[CFU/m³]	[CFU/m²/h]	[min]	Antal under operationstid	Antal under operationstid	Antal under operationstid	Antal under operationstid
Turbulent airflow - TAF								
I	1	9	209,6	60	7	4	5	0
	2	9	221,4	71	7	4	1	0
	3	22	54,2	58	7	4	3	0
J	1	34,5	524	48	7	4	0	0
	2	23,5	235,8	40	7	4	0	1
	3	22	0	39	7	4	0	0
K	1	9	238,8	79	7	4	0	0
	2	14,5	129,6	97	7	4	0	2
O	1	4	29,9	105	10	4	3	2
	2	6	134,7	70	8	4	5	2
	3	1	55,2	57	8	4	1	1
Q	1	33	898,2	35	8	5	0	2
	2	21,5	309,2	61	8	5	0	0
	3	14	318,9	69	8	5	2	0
	4	4	251,5	50	8	5	1	1
	5	33	235,8	40	8	5	1	0

Figur 51: Tabel TAF - Adfærd på operationsstuen.

9.3 Energi

I nærværende kapitel analyseres og beregnes energiforbruget for drift af en OP-stue.

Dette værende både årlig energimæssige driftsomkostninger, energiforbrug og udgift pr. operation etc. for de respektive OP-stuer, der indgår i projektet.

For gennemførelse af disse beregninger indgår de registrerede og målte parametre eksempelvis som luftmængder, trykforhold, temperaturændringer i varme- og køleflader mv.

Som tidligere anført, er der udført og registreret, før og under live operationerne samt måling af ovennævnte parametre. Disse er indført i checkskemaer for hver enkelt OP-stue.

Checkskemaer for hver enkelt OP-stue kan ses under bilag 5.

Efterfølgende gennemgås de målte og registrerede parametre omkring ventilationssystemet til de pågældende OP-stuer.

Parametre, der indgår i beregning af energiforbruget, samt den statistiske analyse af faktorer, der kan påvirke mikrobiologiske miljø på OP-stuen.

9.4 Parametre: Ventilationsmæssige karakteristika for OP-stuerne.

Efterfølgende viste skema er et koncentrat af alle skemaer, målinger og beregninger anvendt til udregning af energiforbrug. Et samlet skema, men grundet layoutbetingelserne er det opdelt i to.

Areal. Arealmæssigt er alle Op-stuer i gennemsnit 46 m², hvilket er under den anbefalede værdi fra FSTA på 80 m² [25].

LAF-hastighed havde et stort udsving fra 0,23 til 0,41 m/s. FSTA anbefaler > 0,4 m/s [25].

LAF-dele opsat i 0'erne var oftest dimensioneret efter den tids de facto standard - 0,3 m/s.

Overtryk. Målte overtryk fra OP-stue til referencepunktet i det tilstødende område/rum, viser en stor forskel mellem minimum 2 Pa og maksimum på 28 Pa. Middel og 50 % fraktil ligger på ca. 14 Pa og er indenfor det anbefalede område på 10-15 Pa [25]. Der er en overvægt af værdier i den høje ende fra 50 til 75 % fraktil.

HEPA-filtre. Filterklassen (filtreringsgraden) er enten HEPA filterklasse H13, H14 på alle stuer, dog undtagelse ved OP-stue Q med H11 samt J, K med lav filterklasse - F9 (ikke HEPA-filter).

Varmegenvinding og luft. Temperaturvirkningsgraden for varmegenvindingssystemet varierer en del.

På de OP-stuer, der forsynes med udeluft fra et stort fællesanlæg eller får udeluft fra stort fælles sugekammer med fælles filtrering, er det ofte koblede batterier som varmegenvindingsprincip.

Ved ældre anlæg vil temperaturvirkningsgraden typisk ligge omkring 50 % ved luftbalance - ligeværdigt forhold mellem indblæsnings- og udsugningsluftmængderne.

Indblæsningsluftmængden på disse fællesanlæg er større end den udsugende hovedluftmængde, idet anlægget forsyner områder med overtryk (eksempelvis OP-stuer).

Dermed reduceres temp. virkningsgraden.

Stand alone anlæg eller anlæg, der betjener 2-3 OP-stuer, kan, grundet dets mindre fysiske størrelse og en central placering, være med x- eller rotorveksler med større temperatur virkningsgrad. Reducering af temperatur virkningsgrad pga. luftmængdeforhold indblæsning og udsugning er også gældende.

For alle OP-stuer gælder at optimering, ud over vedligehold mht. rengøring, vandmængder, pumpestyring samt check bypass funktion, på x-veksler, ikke er rentabelt andet end ved nyanlægsinvestering. Aspekt analyseres ikke i nærværende projekt.

Virkningsgrad for ventilatorer ligger indenfor det nedre normalområde med få outliers.

Flertallet af ventilatorer er enten direkte drevne kammerventilatorer med EC-motorer eller centrifugalventilatorer med energieffektive bagudkrummede skovle.

Samme argumentation som for varmegenvinding og aspekt omkring evt. optimering af ventilatorer analyseres ikke nærmere i projektet.

LAF og TAF- OP-stuer:

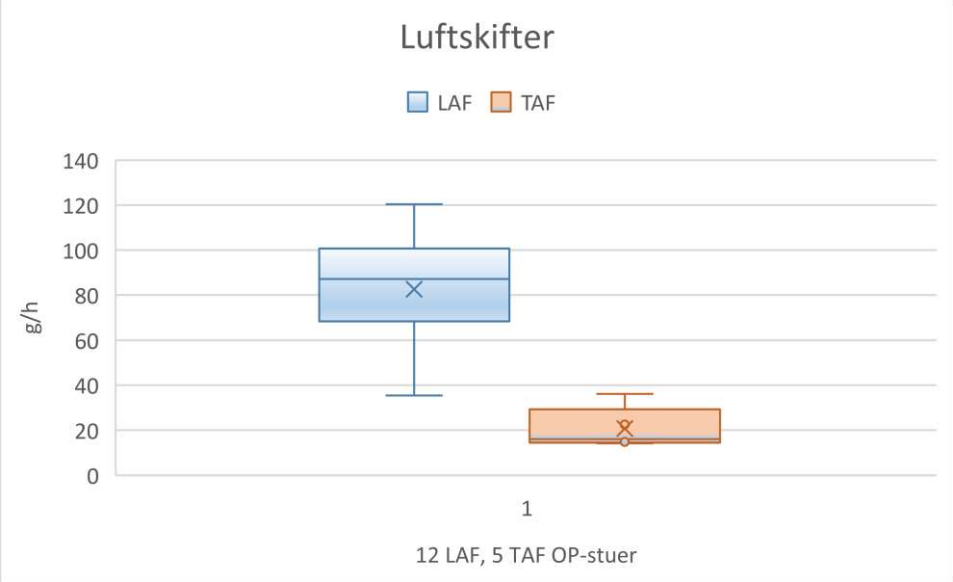
Hospital Anonym	OP stue	Type	Etablering (år)	Areal (m²)	Volumen (m³)	Godkendelse		Slutfilter	LAF hastighed (m/s)	LAF str.			Udeluft, målt (m³/h)	Luftmængde total (m³/h)				Luftskifte (g/h)	
						Klassificering stue (isoklasse)	Rapport Dato			L (m)	B(m)	Areal (m²)		LAF Recirkuleret incl. evt. injiceret udeluft over LAF dug	Udeluft (injiceret over LAF dug)	Indbl. direkte i OP-stue	Udsugning/Afkast	Udeluft	Total
A	OP10	LAF	1997	47	149	5	17.07.2017	H13	0,40	2,45	2,45	6,0	1.581	11.232	1.581	0	380	10,6	75
B	OP1	LAF	2005	39	109	5	18.10.2018	H14	0,18	2,95	2,95	8,7	2.079	5.832	2.079	0	1.484	19	54
C	OP4	LAF	2006	43	128	5	-	H13	0,41	3,00	3,00	9,0	1.876	13.175	1.876	0	747	15	103
D	OP5	LAF	2009	33	99	5	01.11.2018	H14	0,30	3,00	3,00	9,0	2.913	9.869	2.913	0	2.099	29	100
E	OP21	LAF	2003	38	106	5	16.10.2018	H13	0,35	3,20	2,60	8,3	1.746	9.574	1.746	0	932	16	90
F	OP7	LAF	2011	62	187	5	02.01.2019	H13	0,35	3	3	9,0	2.378	12.511	2.378	0	1.413	13	67
G	OP3	LAF	1994	58	184	5	15.10.2018	H14	0,23	2,5	2,5	6,3	2.398	6.544	2.398	0	909	13	36
H	OP1	LAF	2006	43	129	5	10.07.2018	H13	0,23	3,23	3,08	9,9	1.310	8.100	0	1.310	326	10	73
L	OP3	LAF	2005	40	107	5	12.07.2017	H14	0,35	3,30	3,10	10,2	3.876	12.890	3.876	0	1.000	36	120
M	OP12	LAF	?	47	136	5	-	H14	0,33	3,30	3,10	10,2	1.429	*11.700*	1.429	0	220	10,5	86
N	OP43	LAF	?	44,3	120	5	-	H14	0,27	3,4	3,2	10,9	2.084	10.575	2.084	0	1.926	17	88
P	OP8	LAF	?	57	164	7	28.11.2018 Klarer ISO - klasse 5	H13	0,42	3,1	3	9,3	3.265	16.623	3.265	0	1.800	20	101
I	OP6	TAF	2017	41	122	5	27.10.2018	H14	-				1.371	-	-	4.392	3629, afkast 607	11	36
J	OP1	TAF	?	40	134	Ingen partikelmåletest kun CFU. <10 CFU/m³ dog kun målt "at rest".	10.08.2018	F9	-				1.994	-	-	1.994	561	15	15
K	OP2	TAF	?	38	130		10.08.2018	F9	-				1.834	-	-	1.834	320	14	14
O	OP322	TAF	2016/17	58	173	5	04.05.2018	H13	-				3.915	-	-	3.915	2.836	23	23
Q	OP9	TAF	2005	48,6	145,8	7	21.06.2018	H11	-				2.341	-	-	2.341	950	16	16

Figur 52: Oversigt registrerede, målte og beregnede data for de respektive hospitaler.

LAF og TAF-OP-stuer:

Hospital Anonym	OP stue	Type	Overtryk, målt fra OP til forskellige tilstødende rum (Pa)		Arbejdstilsynets krav udeluft	Temp. virkningsgrad		Virkningsgrad ventilatorer					Active Slit sampling. Average Colour Red over 10 CFU/m³ (CFU/m³)	Passive sedimentation, Average (CFU/m²/h)
			min.	max.	20 m³/h/m².Min. 1200 m³/h	OP- modus	Set Back Modus	Indbl. hovedanlæg	Indbl. Op-stue	LAF hvis separat	Udsugning Op-stue	Uds. Hovedanlæg		
A	OP10	LAF	10,7	13,7	931,2	0,86	0,78	0,57	0,55	-	0,53		0,5	130
B	OP1	LAF	11	11	783,9	0,39	0,39	0,49	-	0,44	-	0,39	3,2	44
C	OP4	LAF	1,2	13	855,5	0,35	0,38	0,73	-	2,9 kW til 13.195 m³/h. CNA630 vurderet 0,65	-	0,49	0,0	0
D	OP5	LAF	14,3	14,3	660	0,57	0,59	-	0,42	1,07 kW til 9.869 m³/h. Vurderet 0,5	0,1	-	1,3	35
E	OP21	LAF	1	1,6	760	0,79	0,88	-	0,62	-	0,15	-	0,5	12
F	OP7	LAF	26,5	26,8	1.246	0,53	0,53	0,6	-	0,61	-	0,52	0,4	0
G	OP3	LAF	11	11	1.152	0,63	0,63	-	0,79	-	0,33	-	0,2	60
H	OP1	LAF	-	14	861	0,44	0,47	0,68	-	0,45 og 0,47	-	0,75	0,5	45
L	OP3	LAF	1	15	793	0,40	0,42	0,72	-	1,2 kW til 12.890 m³/h. 0,5	-	0,66	0,0	0
M	OP12	LAF	3	5,6	939	0,46	0,50	0,61		0,5 og 0,5		0,46	2,1	62
N	OP43	LAF	14	14	886	0,60	0,60	0,6		0,6		0,6	2,3	34
P	OP8	LAF	26	28	1.135	0,80	0,88	-	0,64	-	0,8	-	0,3	0
I	OP6	TAF	0,2	11,5	811	0,80	0,25	-	0,77	-	-	0,66	13,3	162
J	OP1	TAF	0,2	7,5	805	0,50	0,50	0,59	0,56	-	0,42	0,59	26,7	253
K	OP2	TAF	6,7	16,7	763	0,50	0,50	0,59	0,56	-	0,42	0,59	11,8	184
O	OP322	TAF	5	18	1.156	0,82	0,78	0,6	-	-	-	0,47	3,6	73
Q	OP9	TAF	19,6	26	972	0,34	0,47	0,94!	-	-	-	0,48	21,1	403

Figur 53: Oversigt registrerede, målte og beregnede data for de respektive hospitaler

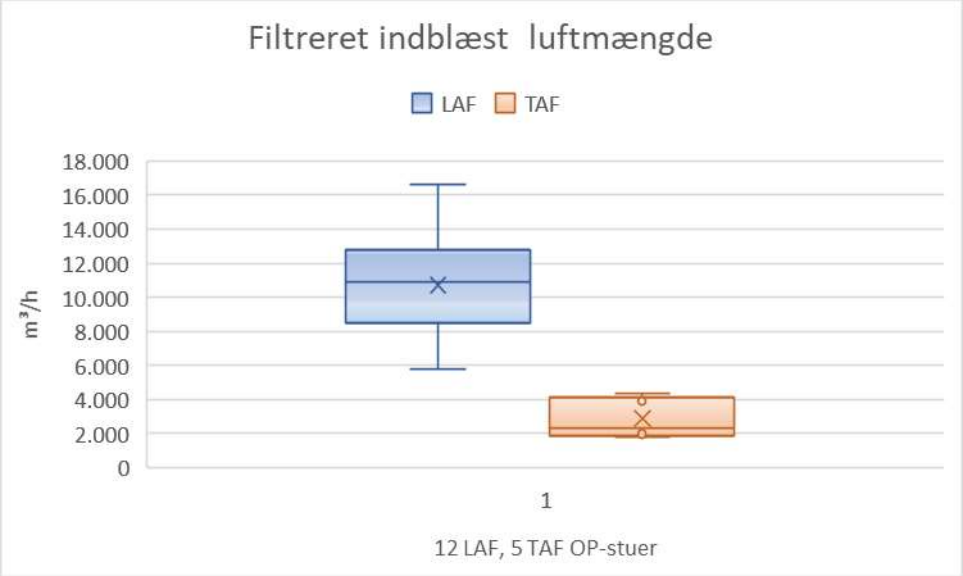


Luftskiftet for LAF er højere end for TAF-stuerne.

Laveste luftskifte for en LAF stue, tilsvarer den højeste værdi for en af TAF-stuerne.

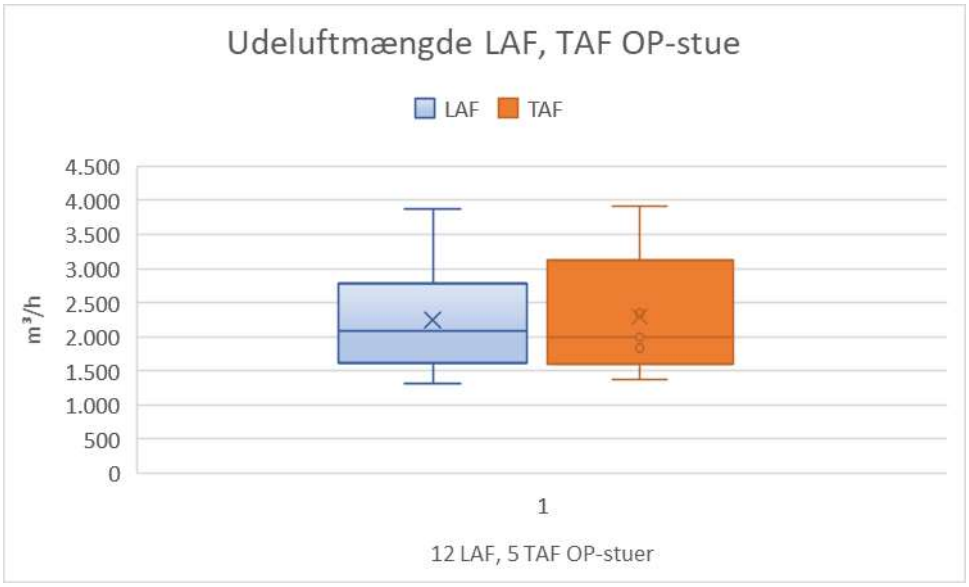
Der er større spredning på LAF-stuerne.

Figur 54: Box plot Luftskifter



Naturlig afledt af de større luftskifter på LAF-stuerne, er den faktuelle indblæste luftmængde af filtreret luft også væsentlig højere for LAF end for TAF-stuerne.

Figur 55: Box Plot indblæst luftmængde



Udeluftmængden på LAF-stuerne har både stort spænd mellem max. og min. samt en høj middelværdi omtrent på linje med TAF-stuerne.

TAF-stuernes varians på udeluftmængden mellem 25 og 75 % fraktilen er større end for LAF-stuernes vedkommende.

Figur 56: Box Plot udeluftmængden.

Arbejdstilsynets vejledende værdi på minimum 1.200 m³/h og 20 l/s pr. m² er overholdt. [25]

9.5 Energiforbruget ved hver operation

Energiforbrug, driftsomkostninger og CO_2 emission er beregnet i nuværende situation, As Is samt optimeret situation Level 1 og Level 2.
Der henvises til Bilag 2 Tekniske beregner for en detaljeret beskrivelse af beregninger og tiltag.

Nuværende situation – As Is.

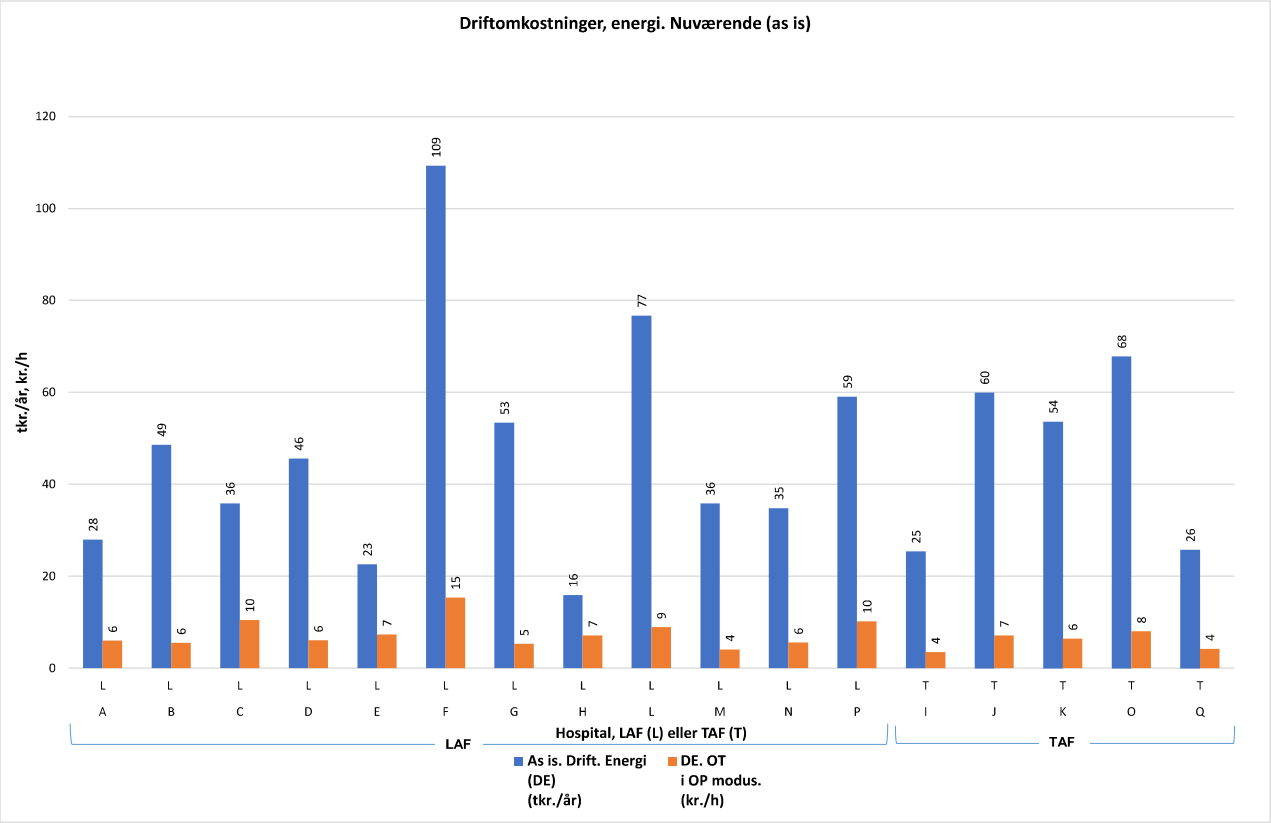
Energimæssige beregninger er gennemført, og resultat for den nuværende, As Is, situation er vist nedenfor.
De driftsmæssige energiomkostninger for alle operationsstuer er ca. 800.000 kr. svarende til 920.000 kWh/år, mens CO_2 emission er samlet 20,5 ton/år.

OT	LAF/TAF	As Is				
		Drift. Energi (DE) (kr./år)	As is. Drift. Energi (DE) (tkr./år)	DE. OT i OP modus. (kr./h)	As is. Energiforbrug (kWh/år)	CO2 emission (kg/år)
A	L	27.993	28	6	27.741	584
B	L	48.616	49	6	50.771	1.172
C	L	35.805	36	10	44.355	1.025
D	L	45.581	46	6	44.910	1.028
E	L	22.596	23	7	22.713	352
F	L	109.288	109	15	129.298	2.785
G	L	53.379	53	5	76.105	2.696
H	L	15.901	16	7	18.192	320
L	L	76.654	77	9	77.874	1.471
M	L	35.808	36	4	34.194	143
N	L	34.824	35	6	38.739	971
P	L	59.069	59	10	58.068	573
I	T	25.381	25	4	31.786	974
J	T	59.941	60	7	83.784	1.919
K	T	53.626	54	6	74.380	1.649
O	T	67.807	68	8	72.019	1.688
Q	T	25.704	26	4	34.110	1.122
Sum		**797.971**			**919.037**	**20.472**

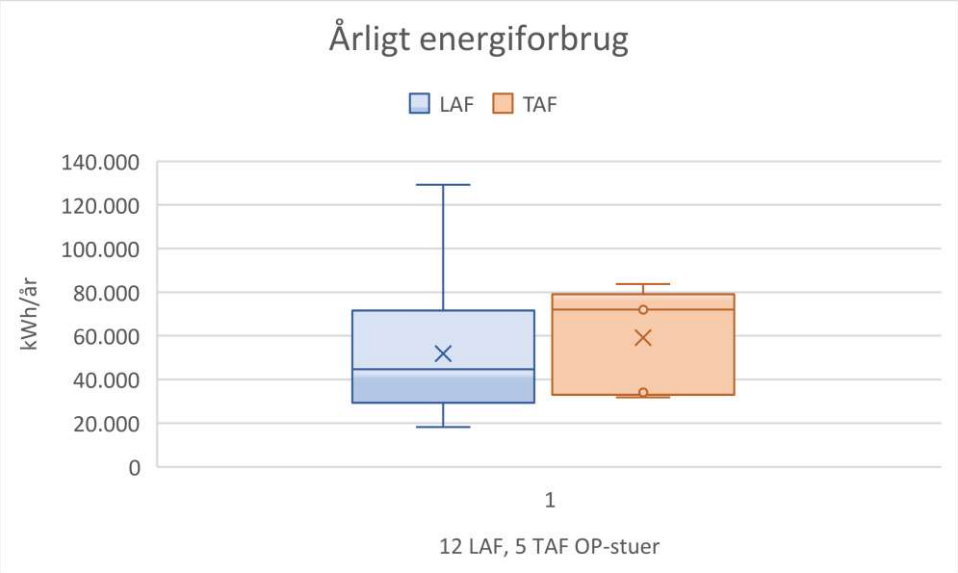
Figur 57: As Is. Driftsomkostninger, energi og CO2 emission

De faktiske årlige driftsomkostninger, (el, varme og køling) på operationsstuerne og omkostninger per igangværende operationstime, er anført i figuren nedenfor.

Der er stor spredning i det beregnede årlige energiforbrug for LAF-stuer. Hospital F ligger højest med 130.000 kWh/år, som skyldes en energitung LAF-del, og at anlægget kører døgnet rundt.



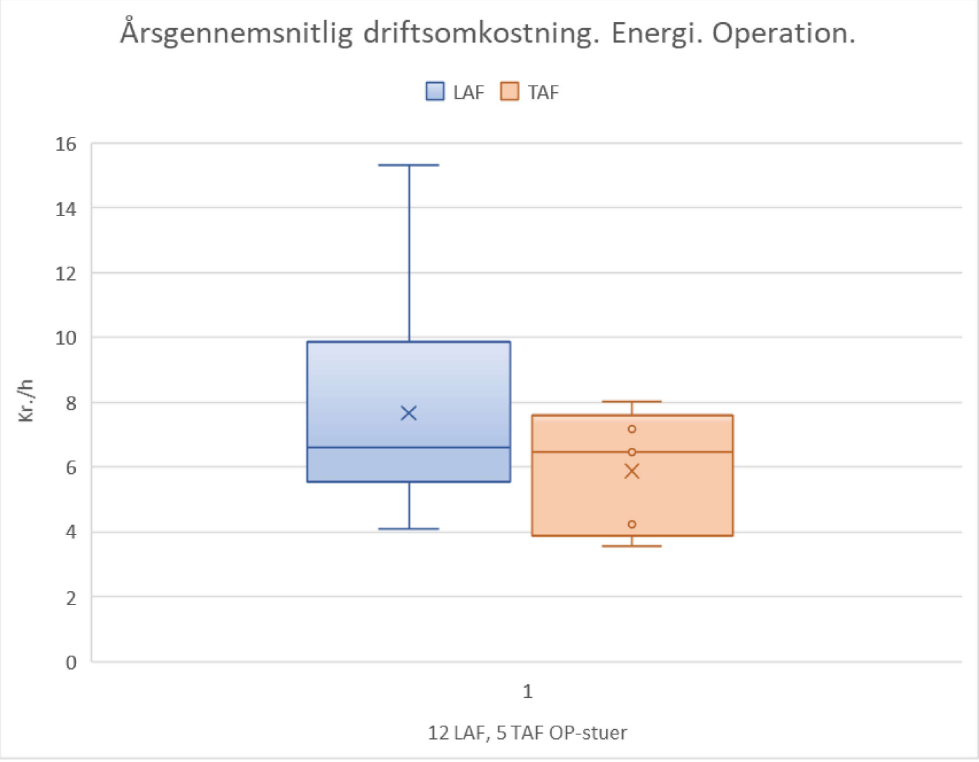
Figur 58: Oversigt over årlige driftsomkostninger og per igangværende operationstime på OP-stuerne.



Som anført i figuren 59 ligger LAF-stuerne lavere end for TAF-stuerne. Middelværdi er ligeledes lavere. Ca. 50.000 kWh/år for LAF og ca. 60.000 kWh/år for TAF.

Årsager til forskelle er, foruden anlægsopbygningen og luftmængder, fordelingen af driftstimer mellem operation og Set Back perioden.

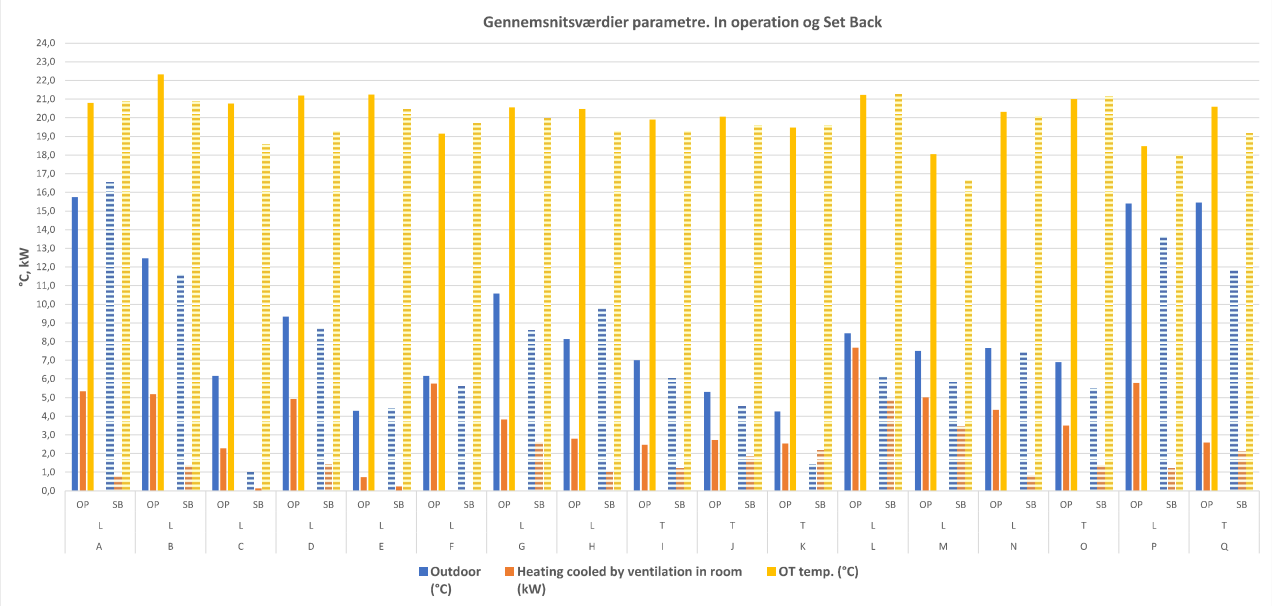
Figur 59: Box Plot. Årligt energiforbrug.



Energiudgift pr. operationstime, før energioptimering, viser, at der er stor spredning på LAF-stuerne og højere for LAF (Figur 60). Medianen for LAF og TAF er omtrent lig hinanden.

Helhedsbetragtningen - årligt energiforbrug og driftsomkostning er det, som efterfølgende er i fokus for både LAF og TAF.

Figur 60: Box Plot. Årsgennemsnitlig driftsomkostninger.



Figur 61:AS Is situation. Gennemsnitsværdier, parametre ved modi "In operation" og Set Back

Ovenfor viste diagram angiver de målte temperaturer målt på OP-stuen, den beregnede bortkølede varmeeffekt vha. ventilationen til OP-stuen samt den aktuelle gennemsnitlige udetemperatur under målingerne.

De vandrette linjer er gennemsnitsværdien. Solide søjler er under operation og stiplede søjler er i Set Back.

Farve for kategori for søjler er overført til vandrette linjer gennemsnitsværdi.

Der ses, at ved høj udetemperatur ligger rumtemperatur for OP-stue over gennemsnittet. A, B, Q. P afviger med rumtemperatur under gennemsnit selv for Set Back.

P, M, K og F er de OP-stuer med den laveste rumtemperatur under operation.

- Yderligere optimeringsmuligheder ved større setpunktsdifferentering sommer/vinter. Lavere setpunkt i varmesæsonen (vinterperioden) og højere i kølesæsonen (sommerperioden).

Generelt er der ikke stor forskel på rumtemperatur under operation og i Set Back perioden.

Den kommende standard CEN TC 156 angiver, at evt. køling, affugtning i Set Back perioden kan udelukkes.

- Større differentiering mellem temperatursetpunkt i operation og Set Back vil reducere energiforbruget yderligere.
-

Gennemsnitstemperaturen for udeluft OP/SB er 8,9 °C/7,5 °C, hvilket er tæt på årsmiddeltemperaturen på 8 °C.

Transmissionstab for OP-stuer, placeret med ydervægge og med vinduer til det fri, indikerer at den beregnede varmebelastning på Op-stuen ved operationer er årsgennemsnitlig. Solindfald er ikke medtaget.

Ovennævnte energifokusområder er ikke medtaget i beregninger i nærværende projekt. Tiltag betragtes som almindeligt vedligeholdelse, idet det er setpunktsændringer i CTS-systemet.

9.6 Simulering af energiforbrug

Level 1 optimering.

Reducering af den driftstid, hvor OP-stuerne ventileres som værende i OP-modus.
Alle OP-stuer er beregnet med Set Back fra kl. 16.00 til kl. 07.00.

OT	LAF/TAF	Level 1						
		DE. Optimiz. Level 1 (kr./år)	LV1. Energi besparelse (kr./år)	LV1. Drift. Energi (DE) (tkr./år)	LV1. Energiforbrug (kWh/år)	LV1. Energi besparelse (kWh/år)	CO2 emission (kg/år)	LV1. CO2 besparelse (kg/år)
A	L	25.280	**2.713**	25	26.279	**1.461**	494	**90**
B	L	45.375	**3.241**	45	44.945	**5.826**	1.138	**34**
C	L	31.777	**4.028**	32	37.905	**6.450**	870	**155**
D	L	45.581	**0**	46	44.910	**0**	1.028	**0**
E	L	22.596	**0**	23	22.713	**0**	352	**0**
F	L	53.716	**55.572**	54	63.982	**65.316**	1.931	**854**
G	L	53.379	**0**	53	76.105	**0**	2.696	**0**
H	L	14.949	**952**	15	16.896	**1.296**	280	**40**
L	L	73.023	**3.631**	73	75.453	**2.421**	1.456	**15**
M	L	20.304	**15.504**	20	23.858	**10.336**	81	**62**
N	L	34.824	**0**	35	38.739	**0**	971	**0**
P	L	54.467	**4.602**	54	53.746	**4.322**	506	**67**
I	T	24.660	**720**	25	32.202	**-416**	1.038	**-64**
J	T	59.941	**0**	60	83.784	**0**	1.919	**0**
K	T	53.626	**0**	54	74.380	**0**	1.649	**0**
O	T	67.807	**0**	68	72.019	**0**	1.688	**0**
Q	T	21.584	**4.121**	22	28.522	**5.588**	929	**194**
Sum			**95.084**			**102.599**		**1.446**

Figur 62: Energiforbrug, driftsomkostninger Level 1 optimeringen.

Luftmængder under operation er således ikke ændret, og dermed er de mikrobiologiske forudsætninger bibeholdt for ultraren OP-stue.

Oprensningstider er beregnet under Bilag 2, og for OP-stuer med laveste luftmængde lå denne under 15 minutter med 5 eller 7 personers kilde belastning, ved maksimal aktuel luftmængde i OP-modus. Det opfylder kravene i CEN TC 156 standard, der står til snarlig udgivelse.

Der opnås en energibesparelse på 95.000 kWh/år svarende til 103.000 kr/år. CO_2 emission reduceret med 1,5 ton/år.

OT	LAF/TAF	Level 1						
		DE. Optimiz. Level 1 (kr./år)	% ændring	LV1. Drift. Energi (DE) (tkr./år)	LV1. Energiforbrug (kWh/år)	% ænfring	CO2 emission (kg/år)	% ændring
A	L	25.280	10%	25	26.279	5%	494	15%
B	L	45.375	7%	45	44.945	11%	1.138	3%
C	L	31.777	11%	32	37.905	15%	870	15%
D	L	45.581	0%	46	44.910	0%	1.028	0%
E	L	22.596	0%	23	22.713	0%	352	0%
F	L	53.716	51%	54	63.982	51%	1.931	31%
G	L	53.379	0%	53	76.105	0%	2.696	0%
H	L	14.949	6%	15	16.896	7%	280	12%
L	L	73.023	5%	73	75.453	3%	1.456	1%
M	L	20.304	43%	20	23.858	30%	81	43%
N	L	34.824	0%	35	38.739	0%	971	0%
P	L	54.467	8%	54	53.746	7%	506	12%
I	T	24.660	3%	25	32.202	-1%	1.038	-7%
J	T	59.941	0%	60	83.784	0%	1.919	0%
K	T	53.626	0%	54	74.380	0%	1.649	0%
O	T	67.807	0%	68	72.019	0%	1.688	0%
Q	T	21.584	16%	22	28.522	16%	929	17%
	Gennemsnit		9,4%			8,5%		8,4%

Figur 63: Level 1 optimering. Procentvis forbedring

Gennemsnitligt en reduktion på ca. 10 %.

Omkostning til implementering er ikke prissat. Primære tiltag er:

- Ændring driftstider i CTS- systemet.
- Fokus på energirigtig adfærd på OP-stuen, hvor der er manuel start/stop af LAF-del.
- Installering PIR-sensor og/eller check up på eksisterende sensor, at funktionen virker.

Level 2 optimering

Med udgangspunkt i, at Level 1 tiltag implementeres, med øget Set Back periode, beregnes Level 2 ud fra følgende, som alt lever op til dagens krav:

- Reducering overtryk til 12 Pa i Op-modus. Hvis OP-stue ligger under 12 Pa, øges overtryk til denne værdi.
- Reducering overtryk til 8 Pa i Set back perioden. Hvis overtryk i SB-perioden ligger under de 8 Pa ud fra målinger og beregninger, øges overtryk til 8 Pa.
- Reducering af lækageareal for OP-stue så mindre luftoverskud kan generere overtryk på 12 Pa i OP-modus og 8 Pa i Set Back.
- Luftskifte på OP-stuer i OP-modus ændres ikke. Ingen indflydelse på de mikrobiologiske forhold.
- Anbefaling i CEN TC 168 omkring ventilering af OP-stuen i SB-perioden overholdes og endda med en sikkerhedsmargin indbygget.

For detaljeret forklaring og fremgangsmåde. Se bilag 2 og metodeafsnittet.

OT	LAF/TAF	Level 2							Active Slit sampling. Colour Red over 10 CFU/m³ (CFU/m³)	Passive sedimentation (CFU/m²/h)
		DE. Optimiz. Level 2 (kr./år)	LV2. Energi besparelse (kr./år)	LV2. Drift. Energi (DE) (tkr./år)	LV2. Energiforbrug (kWh/år)	LV2. Energi besparelse (kWh/år)	CO2 emission (kg/år)	LV2. CO2 besparelse (kg/år)		
A	L	33.388	**-5.395**	33	36.370	**-8.629**	953	**-369**	1	130
B	L	28.349	**20.267**	28	26.738	**24.033**	593	**579**	3	44
C	L	31.555	**4.250**	32	37.659	**6.696**	864	**162**	0	0
D	L	18.640	**26.941**	19	19.228	**25.682**	462	**566**	1	35
E	L	25.676	**-3.079**	26	29.903	**-7.190**	695	**-344**	1	12
F	L	35.165	**74.123**	35	39.594	**89.704**	1.084	**1.701**	0	0
G	L	28.591	**24.788**	29	42.347	**33.758**	1.528	**1.167**	0	60
H	L	15.931	**-31**	16	18.495	**-303**	332	**-13**	1	45
L	L	25.439	**51.215**	25	25.868	**52.006**	475	**995**	0	0
M	L	18.484	**17.323**	18	21.377	**12.817**	74	**69**	2	62
N	L	10.941	**23.883**	11	13.039	**25.700**	294	**677**	2	34
P	L	31.558	**27.511**	32	35.516	**22.552**	613	**-41**	0	0
I	T	18.224	**7.157**	18	23.151	**8.634**	718	**256**	13	162
J	T	49.586	**10.355**	50	69.253	**14.532**	1.585	**335**	27	253
K	T	41.468	**12.158**	41	56.668	**17.711**	1.243	**405**	12	184
O	T	28.895	**38.912**	29	32.223	**39.796**	664	**1.024**	4	73
Q	T	18.469	**7.235**	18	25.024	**9.086**	833	**289**	21	403
Sum			**337.613**			**366.585**		**7.459**		

Figur 64: Energiforbrug, driftsomkostninger Level 2 optimeringen.

Resultatet af beregninger og energisimuleringer viser en energibesparelse i forhold til nuværende situation på 338.000 kWh/år svarende til 366.000 kr./år. CO_2 emission reduceret med 7,5 ton/år.

OT	LAF/TAF	Level 2							Active Slit sampling. Colour Red over 10 CFU/m³ (CFU/m³)	Passive sedimentation (CFU/m²/h)
		DE. Optimiz. Level 2 (kr./år)	% ændring	LV2. Drift. Energi. (DE) (tkr./år)	LV2. Energiforbrug (kWh/år)	% ændring	CO2 emission (kg/år)	% ændring		
A	L	33.388	-19%	33	36.370	-31%	953	-63%	1	130
B	L	28.349	42%	28	26.738	47%	593	49%	3	44
C	L	31.555	12%	32	37.659	15%	864	16%	0	0
D	L	18.640	59%	19	19.228	57%	462	55%	1	35
E	L	25.676	-14%	26	29.903	-32%	695	-98%	1	12
F	L	35.165	68%	35	39.594	69%	1.084	61%	0	0
G	L	28.591	46%	29	42.347	44%	1.528	43%	0	60
H	L	15.931	0%	16	18.495	-2%	332	-4%	1	45
L	L	25.439	67%	25	25.868	67%	475	68%	0	0
M	L	18.484	48%	18	21.377	37%	74	48%	2	62
N	L	10.941	69%	11	13.039	66%	294	70%	2	34
P	L	31.558	47%	32	35.516	39%	613	-7%	0	0
I	T	18.224	28%	18	23.151	27%	718	26%	13	162
J	T	49.586	17%	50	69.253	17%	1.585	17%	27	253
K	T	41.468	23%	41	56.668	24%	1.243	25%	12	184
O	T	28.895	57%	29	32.223	55%	664	61%	4	73
Q	T	18.469	28%	18	25.024	27%	833	26%	21	403
Gennemsnit			**34,0%**			**31,1%**		**23,1%**		

Figur 65: Level 2 optimering. Procentvis forbedring.

Procentvis besparelse er på 34 % for driftsomkostninger og 31 % på energiforbruget. CO_2 emission reduceres med 23 %.

Energi- og driftsbesparelser opdelt på LAF og TAF, og viser den procentvise største reduktion for LAF-stuerne med en forskel på op til 4 % ned til TAF-stuerne

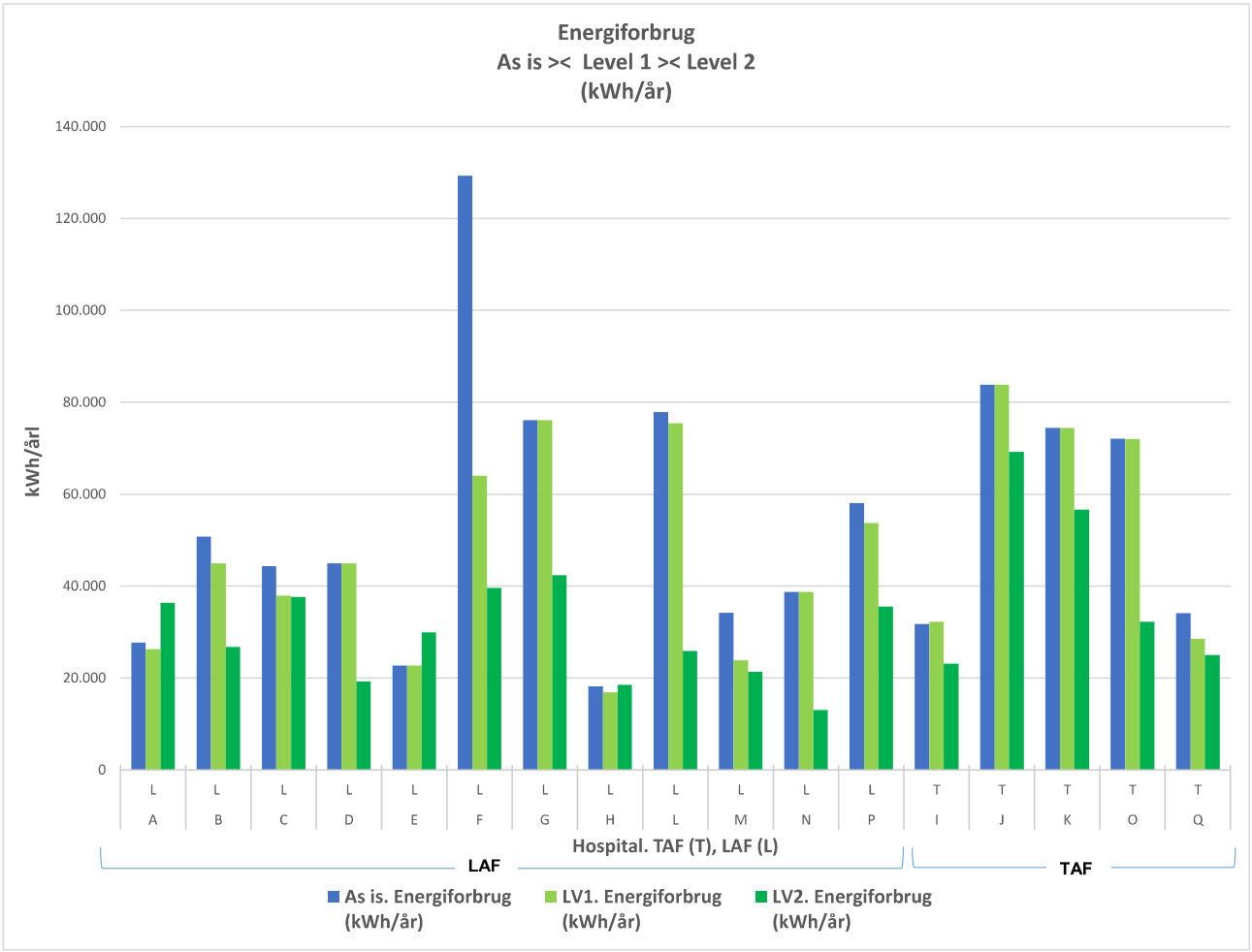
Besparelser, uden at kompromittere den mikrobiologiske sikkerhed omkring luftskifte, LAF luftmængder og hastighed etc., som er uændrede.

Oversigt de simulerede situationer

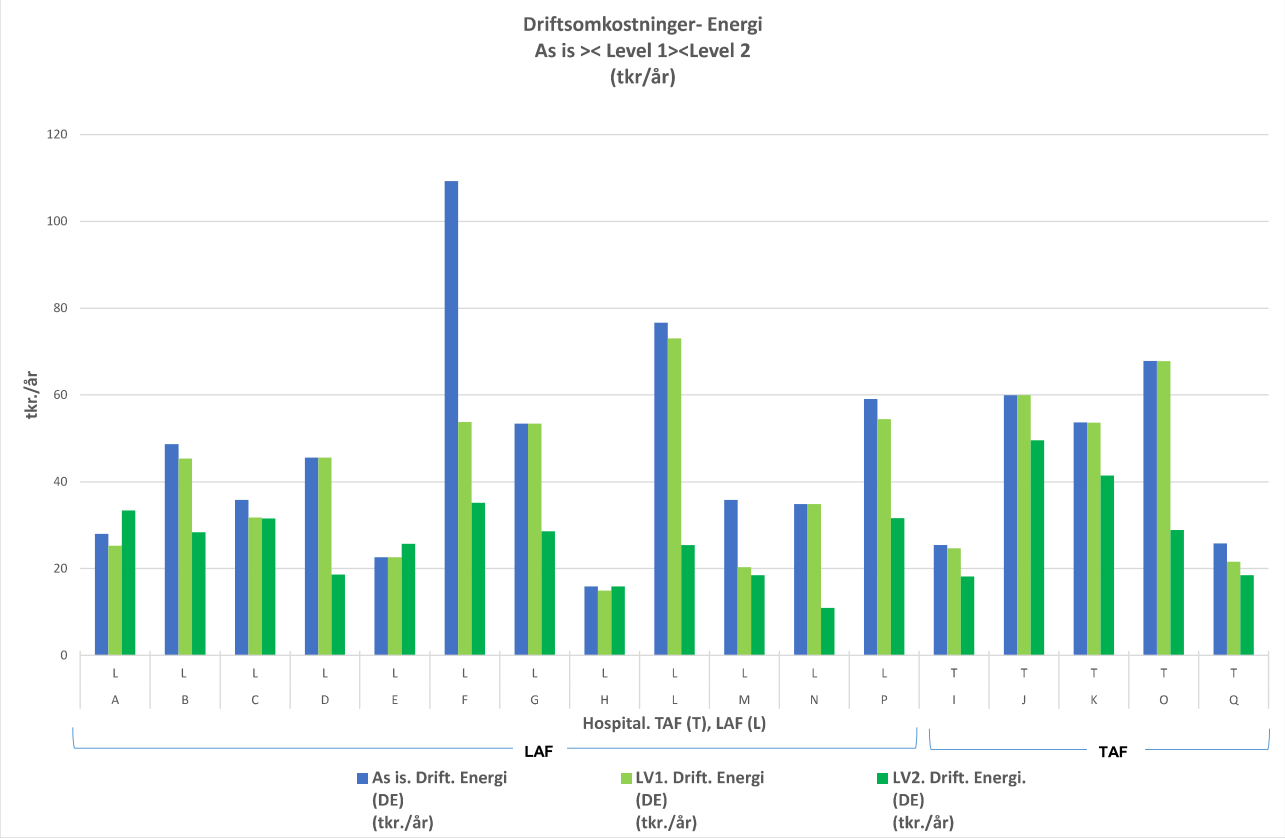
Figuren viser progressionen i energiforbruget fra udgangspunktet over Level 1 til Level 2.

Bemærk at LAF-stue A og E har fået et øget energiforbrug, grundet opgradering i beregningerne til anbefalet overtryk på stuen. Betydelige reduktioner for F, L og O, der primært skyldes for lange driftstider for ventilationssystemet i OP-modus, stor lækage og høj udeluftmængde, der indblæses på OP-stuen.

Generelt er de største reduktioner i energiforbrug i Level 2 tiltag, hvilket skyldes, at de fleste anlæg ligger over anbefalede drifts-værdier, mht. overtryk samt en gevinst ved lækagetætning.



Figur 66: Progressionen i energiforbruget.



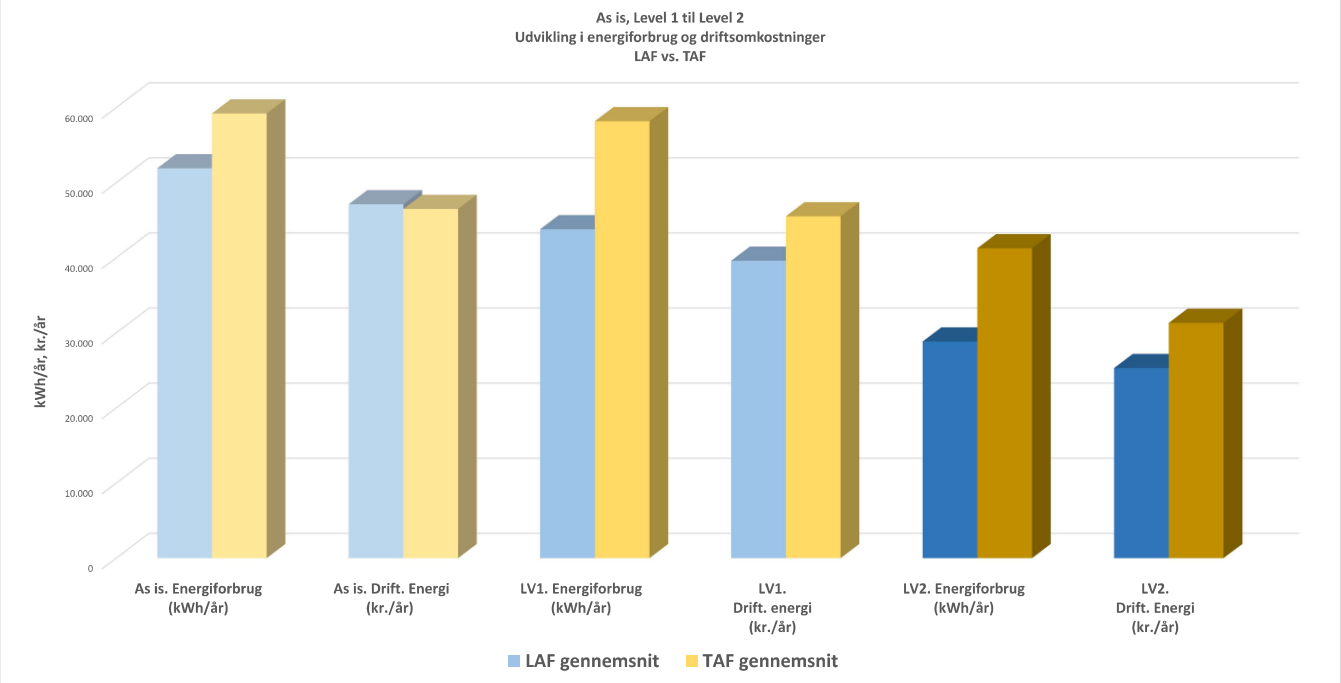
Figur 67: Progressionen i energimæssige driftsomkostninger.

DE er driftsomkostninger energi.

Ovenfor viste diagram viser progressionen i energimæssige driftsomkostninger fra udgangspunktet over Level 1 til Level 2.

Selvom forskelligheden i temperatursetpunkter kan forskyde driftsomkostninger mellem varme og køling (el), er tendensen den samme som for foregående diagram og kommentarer omkring energiforbruget.

Nedenfor er vist udviklingen i det gennemsnitlige for LAF- og TAF-stuers energiforbrug, og driftsomkostninger gennem de 2 faser Level 1 og 2 i relation til udgangspunkt.



Figur 68: Diagram for udvikling i det gennemsnitlige energiforbrug og driftsomkostning for LAF- og TAF-stuer.

Faktuelle værdier til ovenstående diagram med tilhørende gennemsnitsværdier for de mikrobiologiske målinger vist nedenfor.

Vent. princip	As is		Level 1				Level 2				Active sampling, measured (CFU/m³)	Passive sedimentation (CFU/m²/h)
	As is, Energiforbrug (kWh/år)	As is, Drift, Energi (kr./år)	LV1, Energiforbrug (kWh/år)	Besparelse (kWh/år)	LV1, Drift. energi (kr./år)	Besparelse (kr./år)	LV2, Energiforbrug (kWh/år)	Besparelse (kWh/år)	LV2, Drift. Energi (kr./år)	Besparelse (kr./år)		
LAF gennemsnit	51.913	47.126	43.794	8.119	39.606	7.520	28.844	23.069	25.310	21.816	0,9	35,2
TAF gennemsnit	59.216	46.492	58.181	1.034	45.524	968	41.264	17.952	31.329	15.163	15,3	215,1

Figur 69: Samlede gennemsnitsværdier As Is til Level 2 for LAF og TAF.

På nær driftsomkostning energi i "As is" situationen, er LAF-stuer billigst i energimæssig drift med laveste energiforbrug igennem begge optimeringsfaser. LAF 28.800 kWh/år kontra TAF på 41.200 kWh/år.

Procentvis energimæssig besparelse er:

LAF: (51.913 – 28.844)/51.913 ·100 % = 44 %

TAF: (59.216 – 41.264)/59.216 · 100 % = 30 %

Parametre, overtryk og luftmængder, der kan påvirke de mikrobiologiske forhold på OP-stuen under operation, er uændrede i Level 1 og 2 simuleringen.

Mikrobiologiske gennemsnitsværdier for aktiv air sampling samt passiv sedimentation er ligeledes væsentlig lavere for LAF- end for TAF-stuerne.

TAF-stuer ligger en faktor 15 højere end LAF-stuerne ved de aktive airsampling målinger, og faktor 6 højere ved passiv sedimentation.

OP-stue O er den TAF-stue som har den bedste mikrobiologiske performance. O's middelværdier:

Aktiv airsampling: 3,56 CFU/m^3

Passiv sedimentation: 73 CFU/m^2/h

Disse værdier ligger ligeledes højere end de gennemsnitlige værdier for LAF-stuerne med en faktor 4 og 2 for henholdsvis aktiv og passiv måling.

LAF-stuer i projektet viser lavere CFU – målinger, bedre mikrobiologiske forhold, ved et lavere energiforbrug og energimæssig driftsomkostning.

10 Diskussion

Projektet beskæftiger sig overordnet set med et væsentligt samfundsmæssigt problem nemlig klima-området og energiforbrug og heraf CO_2 aftrykket.

Danmark er gået ind med en ambitiøst plan om at nedsætte udslippet af CO_2 med 70% inden 2030. Derfor er der behov for at anvende alle muligheder for at komme i land med dette.

Vi har i dette projekt undersøgt muligheden for at nedsætte energiforbruget på operationsstuer under real-life kirurgi.

Et andet væsentligt problem er infektioner efter operationer, som koster samfundet og mennesket dyrt, og som hvert år medfører, at der går menneskeliv tabt. Der er derfor behov for at undersøge muligheder for at reducere risikoen for infektion.

I dette projekt har vi haft mulighed for både at undersøge energiforbruget og muligheder for reduktion af mikroorganismer (CFU) på operationsstuen.

Dette er den første undersøgelse af sin art på verdensplan, hvor der samtidigt er gennemført bakteriologiske og energimæssige målinger.

Dette har været muligt igennem et unikt samarbejde imellem en række fagpersoner med komplementerende kompetencer. De spænder fra den tekniske viden indenfor anlæg, udvikling samt måling indenfor ventilation, over til det sundhedsfaglige indenfor hospitalshygiejne, mikrobiologi og det kirurgiske. Samtidigt har det gode netværk været faciliterende, for at projektet er gennemført.

Den største styrke ved studiet er, at vi har observeret og indsamlet data under live operationer i den daglige rutine på hospital og operationsstuer med det personale, som normalt er til stede.

En svaghed er, at vi kun har målt på 15 ud af ca. 30 hospitaler. Der er dog ingen grund til at tro, at der vil være store forskelle til de hospitaler, som vi ikke har haft mulighed at måle på.

10.1 Diskussion af vores fund

De inkluderede hospitaler og operationsstuer

Trods at udførelse af både knæ og hofteoperationerne er gennemført ved standardiserede procedurer, var ingen af de inkluderede operationsstuer ens hvad angår LAF- eller TAF- ventilationssystemet. Der var store variationer i varmegenvindingsprincip, recirkulering, antal og placering af varme og køleflader, foruden at luftmængden varierede.

De specifikke formål med denne undersøgelse var at bestemme CFU antal i LAF- og TAF -ventilerede operationsstuer, evaluere betydningen af antallet af personale, dør- og skabslåseåbninger og tekniske parametre for ventilationssystemerne, og deres indvirkning på CFU. Desuden undersøgte vi energiforbruget ved hver operation, samt gennemførte beregninger af mulige besparelser af energiforbrug ved optimering af en række parametre.

10.2 Diskussion af CFU, adfærd og ventilationssystem.

Vores undersøgelse i forhold til antal CFU'er viste, at LAF-ventilerede OP-stuer reducerede CFU-antallet både ved aktiv airsampling samt passiv på agarplader sammenlignet med TAF-stuer. LAF-stuerne havde bedre luftkvalitet med værdier indenfor den anbefalede tærskel på 10 CFU/m^3, mens CFU-tallet oversteg tærsklen i 9 ud af 16 operationer udført i TAF stuer. Disse resultater er i overensstemmelse med vores hypotese og med tidligere undersøgelser, der favoriserer LAF [4, 44-46]. Desuden viste vi, at en stigning i størrelsen af OP-stuen eller af det samlede luftskifte, ville reducere CFU-tallet. Vores resultater viste, at hverken antallet af personer eller antallet af samlede døråbninger havde nogen væsentlig betydning for CFU-antallet. Desuden blev der ikke fundet nogen sammenhæng mellem aktivt eller passivt CFU-tal og hastigheden af luften ud af LAF-delen på LAF-stuen.

Vores tekniske data kan delvis forklare, hvorfor nogle TAF-stuer ikke opfyldte den anbefalede tærskel for CFU-tællinger. Det kan forklares med den type filtre, TAF-stuerne var udstyret med, som er af lavere filterklasse end dem, der findes på LAF-stuerne.

I forhold til vores undersøgelse har andre vist modstridende resultater, typisk på måling af antal infektioner, men ikke på antal CFU'er.

Disse studier har indenfor det sidste årti sat spørgsmålstegn ved fordelene ved LAF til at reducere infektion [38, 40, 47]. Det kan forklares ved udvikling og optimering af ventilationssystemerne eller den anvendte metode, undersøgelsens design, samt multi-faktorielle disponerende faktorer for udvikling af infektionerne.

Vi fandt det vigtigt at måle under real-life kirurgi, og at bruge et surrogatendepunkt for risikoen for SSI. For at måle SSI ville det kræve en meget større stikprøvestørrelse, for at imødekomme de store forskelle i patienter på grund af patientrelaterede faktorer, der muligvis kan påvirke resultatet. Brugen af passiv bakteriel sedimenteringsbelastning blev undersøgt og godkendt af Pasquarella [48]. Det indebærer, at forskellige typer aktive luftprøvetagere giver forskellige værdier af CFU-tal, selv når de bruges samme sted på samme tid. Vores undersøgelse anvender begge metoder til indsamling af CFU-tællinger. Uanset hvilken metode der er brugt, er vores resultater stadig til fordel for LAF-stuerne. Resultaterne var klare og i overensstemmelse med vores tidligere mock-undersøgelse, der viste, at LAF -ventilation havde reduceret CFU-tal sammenlignet med TAF [9].

Vores resultater er i tråd med Andersson [45], der viste at LAF-ventilerede OP-stuer har høj luftkvalitet med lave CFU-niveauer under live operationer. Langvatn [44] understøtter brugen af LAF-ventilerede OP-stuer med stor luft-volumen, ved at finde en lavere risiko for reoperation på grund af infektion sammenlignet med operationer udført i TAF-ventilerede OP-stuer. Det høje luft-volumen ved LAF-ventilation tilvejebringes ved et større antal luftskifte pr. time. Dette er i overensstemmelse med vores resultater, der viser, at et større luftskifte i timen reducerer CFU-antallet.

I modsætning hertil finder Bischoff [40] ikke fordel ved LAF-ventilerede OP-stuer i forhold til at reducere risikoen for SSI. Bischoff er udgivet før det norske studie (Langvatn) og har derfor ikke kunne inddrage dette i deres vurdering.

Bischoff-studiet er grundlaget for WHO-retningslinjen [42], som blandt andet er blevet diskuteret og kritiseret af Whyte [36], der satte spørgsmålstegn evidensen og at ikke var på et tilstrækkeligt niveau.

Vi mener, at CFU-antallet er en valid faktor for udvikling af PJI, da både Birgand [49] og Lidwell [8] har vist sammenhæng mellem niveauet af mikrobiel luftforurening og forekomsten af infektion i leddet. De foreslår derfor, at CFU-tællingen kan bruges som parameter til at vurdere infektionsrisiko. Som følge af dette må vores undersøgelser bidrage til, at LAF kan være at foretrække i forhold til TAF for at minimere risikoen for SSI. Det skal dog anføres, at der findes TAF stuer i Danmark, hvor CFU-tallet kan holdes indenfor kravet på ≤ 10 CFU/m^3.

Oprettelse af luftkvaliteten på operationsstuen er som anført i indledningen af rapporten kompleks og påvirkes af principielt 4 faktorer, nemlig:

1) Adfærd (dør- og skabslåseåbninger og andet),
2) Antal personer,
3) Typen af påklædning samt
4) Ventilationssystem.

Der kan desuden være afledte forhold, som at rummet, der åbnes til, har overtryk og er rent. Under vores undersøgelse blev antallet af personale og døråbninger for det meste holdt på et minimum, og gennemstiksskabe blev brugt i stedet, når det var muligt, men der var nogen variation i operationerne imellem.

Rezapoor [50] har vist, at bevægelse af personale og døråbninger på operationsstuen resulterer i mere luftforurening, samt at LAF-ventilation bevarer luftkvaliteten.

Smith [51] understøtter, at døråbninger øger luftforureningen betydeligt, og at LAF-ventilation reducerer CFU-antallet.

Dette er i overensstemmelse med vores fund, da alle de inkluderede aktive CFU-tal for LAF-stuerne var under den anbefalede tærskel på 10 CFU/m^3 trods trafikken på operationsstuen. Derimod kan vores undersøgelse ikke understøtte, at åbninger af døre og gennemstiksskabe samt antal ansatte har en betydelig på CFU-antallet. Dette kan forklares med, at disse variabler ikke var meget forskellige mellem de forskellige operationer samt robustheden af ventilationen.

Designet og funktionerne i ventilationssystemerne i vores undersøgelse på de forskellige hospitaler varierer meget. Det kan påvirke luftkvaliteten på operationsstuerne. Vi viste med en stigning i volumen af operationsstuen faldt CFU-tællerne betydeligt. Dette kan forklares med, at jo større volumen af OP-stuen, jo mere plads til at fortynde enhver CFU til stede. Dette lægger op til en diskussion af at de operationsstuer, der bygges i dag, ofte ikke lever op til anbefalingerne, men bygges mindre (Se senere).

Samlet set er vores fund på linje med et netop publiceret videnskabeligt studie, hvor man har samlet den nyeste litteratur på området [52]. Her fandt man at

1. effekten af typen, det totale antal luftskifte, hastigheder for ventilationssystemer og tøjmateriale var signifikant forbundet med en ultraclean miljø (middel luftbårne bakterier belastning ≤10 cfu/m^3) tæt på såret.
2. LAF er bedre end TAF-systemer til at reducere luftbårne CFU'er tæt på såret.
3. LAF-systemer betragtes at have betydeligt højere luftmængde strømninger sammenlignet med TAF-systemer.
4. antallet af døråbninger og antal personer til stede, under de kirurgiske indgreb, havde ingen signifikant indvirkning på at opnå et ultra-rent luftmiljø.
5. det samlede antal luftskifter og beklædningstype var signifikant forbundet med at opnå gennemsnitlige niveauer af luftbårne bakterier ≤10 cfu/m^3 tæt på såret.
6. LAF-systemer med stor volumen i overensstemmelse med opnåede middelværdier ≤10 cfu/m3 luft tæt på sårstedet.
7. LAF -systemer kan i kombination med baggrunds TAF, opnå ultra-ren luft (middelværdi ≤10 cfu/m^3) tæt på sårstedet.
8. på TAF-operationsstuer kan der eventuelt opnås ultra-ren luft tæt på såret, især i kombination med beklædningssystemer fremstillet af okklusiv fiberdug materiale.

10.3 Diskussion af energiforbrug.

For de 17 operationsstuer er der konstateret en driftsmæssig samlet energiomkostning på ca. 800.000 kr. svarende til 920.000 kWh/år, mens CO_2 emission er 20,5 ton/år.

Resultatet af beregninger og energisimuleringer viser en potentiel energibesparelse i forhold til nuværende situation på 338.000 kWh/år svarende til 366.000 kr./år. CO_2 emission er reduceret med 7,5 ton/år.

Energibesparelsen kan realiseres forholdsvis nemt – og med stor blivende effekt - ved systematisk vedligeholdelse og drift af operationsstuerne uden at kompromittere den mikrobiologiske sikkerhed. Der kan med fordel etableres nationale standarder/retningslinjer for vedligeholdelse og drift.

Vedligeholdelsen handler især om sikring af systemets drift, funktionssikring af evt. benyttede bevægelsessensorer, filterudskiftninger og monitorering af energiforbruget.

Tidsstyring af operationsstuerne vil hente betydelige og vedvarende energibesparelser. Det handler, i alt sin enkelthed om, at ventilationssystemets drift reguleres i forhold til anvendelsen af operationsstuen. En sådan regulering kan ske gennem central eller lokal styring og overvågning.

En forsigtig aggregering på national plan af de identificerede besparelsespotentialer, viser mulighed for at realisere omkring 15 mio. DKK, svarende til ca. 14.000.000 kWh/år.

Besparelsen er således > 30 %. Driftsmæssig er besparelsen vedvarende, men skal naturligvis endelig kvantificeres gennem vurdering af hver enkelt af de estimerede 700 operationsstuer i Danmark.

Etablering af relevante systemer og rutiner til understøttelse for realiseringen har en omkostning, som overordnet set findes økonomisk sekundær.

CO_2 emissionen vil i tillæg potentielt kunne reduceres med 308 tons/år. Reduktionen er en nettoværdi, da der ikke skal kompenseres gennem kvoter, og besparelsen realiseres ved et faktisk mindre forbrug.

10.4 Diskussion af operationsstuernes driftsstyring, opbygning og efteruddannelsesbehov.

I forbindelse med projektet har vi konstateret en meget stor variation på opbygning af OP-stuerne. Ingen OP-stuer på hospitalerne var ens. Det gælder både i den tekniske del, samt geometrien (nettoareal og højde).

I forhold til det geometrisk på størrelsen af operationsstuen, viste vores studie klart, at rumstørrelsen havde en indflydelse på luftkvaliteten. Jo større, jo bedre kvalitet.

OP-stuer i vores undersøgelser havde et gennemsnits areal på 46 m², med den største på 62 m² og den mindste på 33 m². Man kan derfor stille spørgsmålstegn ved, hvorfor ingen af de testede OP-stuer levede op til et mindste areal på 80 m² [1, 25] (NIR og FSTA).

Den første forklaring er, at flere af operationsstuerne er bygget før de anførte anbefalinger. Det ændrer dog ikke på, at nybyggede operationsstuer i dag ikke lever op til anbefalingen, og at de projekterede på de nye ***Supersygehuse***, heller ikke gør [53].

I forhold til det tekniske, fandt vi en væsentlig forskel i service og vedligeholdelse af ventilationsanlæggene, samt i styringen af driften.

Der kan findes flere forklaringer på den store forskel i drift og vedligeholdelse, der er set på hospitalerne. Det kan skyldes nedsat prioritering og økonomi, men måske en begrænset viden på grund af manglende efteruddannelse kan også spille en rolle. Der kan derfor være behov for efteruddannelses på området, med gennemgang af teknik og energimæssige forhold med betydning for operationsstuernes drift.

Der blev også observeret en stor variation i adfærd i forhold til trafik ind og ud af operationsstuerne, samt antal personer på stuen. Selv om der ikke er blev fundet nogen sammenhæng imellem antal personer på operationsstuen og antal målte CFU'er, synes der at være et behov for oplysning omkring sammenhæng imellem ventilation, antal personer på stuen og beklædning, samt adfærd. Der findes klare retningslinjer på området, som skal efterleves (NIR [1]).

11 Omkostninger ved de forskellige operationsstuer: Drift og anlæg

En del af diskussionen om valg af ventilationsanlæg har gået på anlægs- og drifts-prisen.

Det er tidligere fremsat, at det er væsentlig dyrere at anlægge og drifte LAF i forhold til TAF-stuer.

Af figuren nedenfor, der er fra en rapport for det nye universitetshospital i Århus, er anslået nogle drift- og etableringsomkostninger for de 2 systemer, der tydeligt viser LAF er dyrest

Tabel 2. Årlige driftsomkostninger til ventilation pr. operationsstue

(kr.)	LAF	TAF	Difference
Filterskift	10.000	5.000	5.000
Kontrol m.v.	15.000	5.000	10.000
Energi og drift (el, køling, varme)	25.000	10.000	15.000
I alt drift af ventilationssystem	50.000	20.000	30.000
Afskrivning og forrentning af anlæg	458.732	284.530	174.202
Driftsomkostninger pr. år i alt	508.732	304.530	204.202

*Note: Omkostninger til bygningsdrift og – vedligeholdelse er ikke inkluderet.
Kilde: (Projektafdelingen for Det Nye Universitetshospital, Region Midtjylland 2010).

Figur 70: Tabel 2 – årlige driftsomkostninger til ventilation pr. operationsstue.

Det kan ikke genfindes i vores studie, der baseret sig på real-life operationer. Energiforbruget for LAF-stuerne ligger lavere end for TAF-stuerne (Ca. 50.000 kWh/år for LAF og ca. 60.000 kWh/år for TAF). Der er yderligere at spare, ved de anførte simuleringssituationer resulterende i laveste driftsomkostning for LAF-stuen

Man kan altid diskutere, hvilke parametre, der skal indgå i beregningen, samt hvordan de skal prissættes, men vi mener klart, at man bør nuancere udregningerne.

For den rimelige udregning anno 2021, mener vi at følgende skal indgå for en OP-stue i:

- ***Indkøb, opsætning og implementering***
- ***Drift og vedligehold (Opdatering mod nye/andre krav)***

Indkøb, opsætning og implementering

Det er vigtigt, at man prissætter de 2 systemer (LAF og TAF) ens. Det vil sige, at hvis der i LAF'en er luft- og gasudtag, ekstra lys, el-tilslutninger i teknikbroen osv., bør prisen for dette også medtages i TAF-systemet for at kunne sammenholde omkostningen.

Man skal i diskussionen også forholde sig til luftmængderne, anlægs- og kanalstørrelser, pladsforhold til kanalerne, isolering af kanaler, brandspjæld, styringen osv., da alt dette også har indflydelse på prisen.

I tillæg kan fysiske forhold, valg af leverandør/entreprenør, geometriske forhold etc. også påvirke investeringssummen ved anlæg af OP-stue med LAF eller TAF.

Drift og vedligehold (Opdatering mod nye/andre krav)

Der er stor forskel i fleksibiliteten og robustheden på de 2 ventilations-systemer, hvilket kan have økonomisk betydning.

Der er flere filtre på en LAF, men er de lige så hårdt belastet som på en TAF, og hvordan er udskiftningsraten af filterne på de 2 stuer?

Der kan være fordel i at have et system med fleksibilitet, når der opstår nye krav til OP-stuerne.

Der er for os, derfor ikke et entydigt svar på, om det er dyrere at sætte en LAF op i forhold til TAF, men driftsmæssigt kan vi se, at det er muligt at drifte LAF-stuen billigere.

11.1 Perspektiver

De to store perspektiver med studiet er dels at optimere operationsstuerne med hensyn til at nedsætte antallet af bakterier på operationsstuerne, og dels at reducere energiforbruget igennem flere scenarier.

Med hensyn til ***antallet af bakterier*** har studiet klart vist, at de nedbringes, når der opereres på stuer med LAF i modsætning til TAF, samt at LAF-stuen er væsentlig mere robust, idet ingen havde målinger udenfor det anbefalede niveau, i modsætning til 56 % på TAF-stuen.

Med hensyn til **energiforbrug** er der en direkte mulighed for at nedsætte dette på LAF-stuer, ved at skrue ned for anlæggene udenfor de produktive timer. Vi har vist, at man kan spare op til 50 % af det samlede energiforbrug på de operationsstuer.

Driftsudgifterne er mindre på LAF-stuen, hvilket sikkert er en overraskelse for mange i forhold til anlægsudgifter.

For at optimere driften af operationsstuerne, er der behov for uddannelse af relevante personer.

Der er i dag en række planlagte byggerier i gang, som ikke har taget hensyn til de nye fund.

Der er sandsynligvis fortsat mulighed for at ændre planerne, og man må forholde sig til den nye viden på området, samt konklusionen i herværende rapport.

Vores undersøgelser understøtter det faktum, at LAF reducerede luftforureningen under real-life kirurgi, hvilket antages at reducere risikoen for SSI. Oprettelse af et operationsfelt med lav luftforurening er nødvendig for patientsikkerheden. Vores resultater tyder på, at når man bygger nye operationsstuer, skal man overveje kvaliteten af ventilationssystemet og størrelsen på operationsstuen, hvor ingen i dag lever op til de anbefalede mål.

Patienten er ikke i tvivl om at operationen skal foretages på en operationsstue med tilfredsstillende luftkvalitet.

11.2 Fremtidens intelligente OP-stue for oprettelse af god luftkvalitet

Der er i fremtiden behov for udvikling af mere fleksible operationsstuer, som samtidigt kan opretholde den nødvendige luftkvalitet med henblik på at reducere antallet af infektioner.

Den intelligente operationsstue bør derfor kunne skifte imellem flere forskellig typer operationer, defineret ved forskellige renheds-klasser.

- Man bør digitalt, senest én time før anvendelse, kunne fortælle stuen, hvad den skal bruges til, og derved indstiller den sig selv. En sådan funktion kan kobles til den elektronisk kalender for operationsplanlægning.
- Alle relevante kliniske parametre skal indgå i den præoperative indstilling.
- Alle relevante tekniske parameter, som flow, overtryk og fugtighed, bør digitaliseres og logges via web, mhp. at sikre funktionalitet.
- Stuen bør live kunne føle på renheden/forureningen i udsugningsluften, og derved variere luftmængden efter behov, med henblik på at øge patientsikkerheden.
- De elektroniske enheder bør digitaliseres og overvåges via web. Derved kan service optimeres, og nedlukning minimeres.

11.3 Konklusion

Vores undersøgelse viste at:

Sundhedsfagligt

- *LAF -ventilerede operationsstuer reducerede CFU-tal, sammenlignet med TAF ved real-live kirurgi.*
- *Alle LAF-stuer tilvejebragte ultraren luft med aktivt CFU-tal ≤10 CFU/m^3, mens TAF-stuerne havde for høje værdier ved 56 % (9/16) af procedurerne.*
- *Personalets adfærd, herunder antal og samlede antal døråbninger, havde ikke indflydelse på CFU-tællinger.*
- *Øget fysisk volumen af operationsstuen resulterede i et fald i antal CFU.*

Teknisk

- *Driftsudgifterne energimæssigt var mindre på LAF-stuen.*
- *Simulering viste, at det er muligt at spare op til 50 % af det samlede energiforbrug på operationsstuen.*

Overordnet set er LAF væsentligt mere robust end TAF hvad angår luftkvalitet og er driftsmæssigt billigere. LAF bør indgå i den fremtidige hospitalsplanlægning ud fra både patientsikkerheds- og driftsmæssige aspekter.

12 Referencer

[1] Central Enhed for Infektionshygiejne. Nationale infektionshygiejniske retningslinjer for det præ-, per- og postoperative område. Version 2. Statens Serum Institut: 2020. https://hygiejne.ssi.dk/NIRoperativ [adgang 6. september 2021].

[2] Baastrup R. EU's klimamål, https://www.eu.dk/da/temaer/klima-og-groen-omstilling/eus-klimamaal [adgang 6. september 2021].

[3] Baastrup R. Klimasparekrav for Danmark, https://www.eu.dk/da/temaer/klima-og-groen-omstilling/danmarks-klimamaal [adgang 6. september 2021].

[4] Charnley J, Eftekhar N. Postoperative infection in total prosthetic replacement arthroplasty of the hipjoint. With special reference to the bacterial content of the air of the operating room. British Journal of Surgery 1969; 56: 641-9. https://doi.org/10.1002/bjs.1800560902.

[5] Dale H, Fenstad AM, Hallan G et al. Increasing risk of prosthetic joint infection after total hip arthroplasty. Acta Orthopaedica 2012; 83: 449-58. https://doi.org/10.3109/17453674.2012.733918.

[6] Lidwell OM, Elson RA, Lowbury EJ et al. Ultraclean air and antibiotics for prevention of postoperative infection. A multicenter study of 8,052 joint replacement operations. Acta Orthopaedica Scandinavica 1987; 58: 4-13. https://doi.org/10.3109/17453678709146334.

[7] Gundtoft PH, Pedersen AB, Varnum C, Overgaard S. Increased Mortality After Prosthetic Joint Infection in Primary THA. Clinical Orthopaedics and Related Research 2017; 475: 2623-31. https://doi.org/10.1007/s11999-017-5289-6

[8] Lidwell OM, Lowbury EJ, Whyte W, Blowers R, Stanley SJ, Lowe D. Airborne contamination of wounds in joint replacement operations: the relationship to sepsis rates. The Journal of Hospital Infection 1983; 4: 111-31.

[9] Rosenbeck K, Nielsen L, Clausen G et al. OP Vent - Energieffektiv ventilation på operationsstuer, https://elforsk.dk/projektdatabase/op-vent-energieffektiv-ventilation-pa-operationsstuer; 2015 [adgang 6. september 2021].

[10] Gabriel L, Casey J, Gee M et al. Value-based healthcare analysis of joint replacement surgery for patients with primary hip osteoarthritis. BMJ Open Quality 2019 Jun 9; 8(2): e000549. https://doi.org/10.1136/bmjoq-2018-000549.

[11] Kowalik TD, DeHart M, Gehling H et al. The Epidemiology of Primary and Revision Total Hip Arthroplasty in Teaching and Nonteaching Hospitals in the United States. The Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons 2016 Jun; 24(6): 393-8. https://doi.org/10.5435/jaaos-d-15-00596.

[12] Kamaruzaman H, Kinghorn P, Oppong R. Cost-effectiveness of surgical interventions for the management of osteoarthritis: a systematic review of the literature. BMC Musculoskeletal Disorders 2017 May 10; 18(1): 183. https://doi.org/10.1186/s12891-017-1540-2.

[13] Zimmerli W, Trampuz A, Ochsner PE. Prosthetic-joint infections. The New England Journal of Medicine 2004 Oct 14; 351(16): 1645-54. https://doi.org/10.1056/nejmra040181.

[14] Bozic KJ, Ries MD. The impact of infection after total hip arthroplasty on hospital and surgeon resource utilization. The Journal of Bone and Joint Surgery 2005 Aug; 87(8): 1746-51. https://doi.org/10.2106/jbjs.d.02937.

[15] Osmon DR, Berbari EF, Berendt AR et al. Executive summary: diagnosis and management of prosthetic joint infection: clinical practice guidelines by the Infectious Diseases Society of America. Clinical Infectious Diseases 2013 Jan; 56(1): 1-10. https://doi.org/10.1093/cid/cis966.

[16] Gundtoft PH, Overgaard S, Schønheyder HC, Møller JK, Kjærsgaard-Andersen P, Pedersen AB. The "true" incidence of surgically treated deep prosthetic joint infection after 32,896 primary total hip arthroplasties: a prospective cohort study. Acta Orthopaedica 2015; 86(3): 326-334. http://doi.org/10.3109/17453674.2015.1011983.

[17] Gundtoft PH, Varnum C, Pedersen AB, Overgaard S. The Danish Hip Arthroplasty Register. Clinical Epidemiology 2016; 8: 509-514. http://doi.org/10.2147/CLEP.S99498.

[18] Charnley J. A STERILE-AIR OPERATING THEATRE ENCLOSURE. British Journal of Surgery 1964; 51: 195-202. https://doi.org/10.1002/bjs.1800510308.

[19] Kjærsgaard-Andersen P, Varmarken J, Gebuhr P, Stürup J, Overgaard S, Søballe K. Total Hoftealloplastik Referenceprogram. Dansk Ortopædisk Selskab & Dansk Selskab for Hofte- og Knæalloplastik Kirurgi 2006. https://www.ortopaedi.dk/fileadmin/Guidelines/Referenceprogrammer/THA-referenceprogram.pdf [adgang 12. september 2021].

[20] Noble WC, Lidwell OM, Kingston D. THE SIZE DISTRIBUTION OF AIRBORNE PARTICLES CARRYING MICRO-ORGANISMS. The Journal of Hygiene 1963; 61: 385-391. https://doi.org/10.1017/s0022172400020994.

[21] Seal DV, Clark RP. Electronic particle counting for evaluating the quality of air in operating theatres: a potential basis for standards? The Journal of applied bacteriology 1990; 68(3): 225-230. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.1990.tb02568.x

[22] Hansen D, Krabs C, Benner D, Brauksiepe A, Popp W. Laminar air flow provides high air quality in the operating field even during real operating conditions, but personal protection seems to be necessary in operations with tissue combustion. International Journal of Hygiene and Environmental Health 2005; 208(6): 455-460. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2005.08.008

[23] Stocks GW, Self SD, Thompson B, Adame XA, O'Connor DP. Predicting bacterial populations based on airborne particulates: a study performed in nonlaminar flow operating rooms during joint arthroplasty surgery. American Journal of Infection Control 2010 Apr; 38(3): 199-204. https://doi.org/10.1016/j.ajic.2009.07.006

[24] Dharan S, Pittet D. Environmental controls in operating theatres. Journal of Hospital Infection 2002 Jun; 51(2): 79-84. https://doi.org/10.1053/jhin.2002.1217

[25] Vejledende retningslinjer for ventilation i rum med invasive indgreb, herunder OP-stuer. Version 1. FSD/FSTA: 2014. https://fsta.dk/wp-content/uploads/2014/09/FSD-FSTA-vejledning-om-ventilation-i-rum-med-invasive-indgreb-herunder-OP-stuer-version-1.1-af-1.-september-2014.pdf [adgang 6. september 2021].

[26] Sundhedsstyrelsen. Dokumentation af Kvalitet og Standardisering Ventilation på operationsstuer. Version 1. Sundhedsstyrelsen: 2011. https://www.sst.dk/da/Udgivelser/2011/Ventilation-paa-operationstuer---en-medicinsk-teknologivurdering [adgang 12. september 2021].

[27] Zoon WAC, Heijkant SAM, Hensen JLM, Loomans MGLC. Assessment of the performance of the airflow in an operating theatre. O. Seppänen, & J. Säteri (Eds.), Proceedings of the SCANVAC Roomvent 2007 Conference, 13-15 June 2007, Helsinki, Finland Helsinki, Finland: FINVAC 2007; pp 8

[28] Nielsen PV, Larsen TS. Afprøvning af luftfordelingsprincipper. VENTInet 2006; 17: 12-14.

[29] Löndahl J, Ekolind P, Tammelin A, Ramstorp M, Civilis A, Larsson P. Energieffektiv ventilation för sjukhus och renrumsmiljöer inom industrin. E2B2, Energimyndigheten 2017; 04. https://www.e2b2.se/library/3117/slutrapport_energieffektiv_ventialation_for_sjukhus.pdf [adgang 13. september 2021].

[30] Halton. LFU – Ceiling Laminar Flow Unit (CE), https://www.halton.com/products/lfu-laminar-flow-diffusers-en/; [adgang 13. september 2021].

[31] Alsved M, Civilis A, Ekolind P et al. Temperature-controlled airflow ventilation in operating rooms compared with laminar airflow and turbulent mixed airflow. Journal of Hospital Infection 2018; 98(2): 181-190. doi: http://doi.org/10.1016/j.jhin.2017.10.013.

[32] EMW filtertechnik GmbH. ISO 29463 - New test standard for HEPA Filters, https://www.emw.de/en/filter-campus/iso29463.html; [adgang 6. september 2021].

[33] Eurovent Association. Selection of EN ISO 16890 rated air filter classes, https://eurovent.eu/?q=content/eurovent-423-2020-selection-en-iso-16890-rated-air-filter-classes-third-edition-english; 2020 [adgang 6. september 2021].

[34] Lidwell OM, Lowbury EJ, Whyte W, Blowers R, Stanley SJ, Lowe D. Effect of ultraclean air in operating rooms on deep sepsis in the joint after total hip or knee replacement: a randomised study. British Medical Journal (Clinical research ed) 1982; 285: 10-4.

[35] Alexakis PG, Feldon PG, Wellisch M, Richter RE, Finegold SM. Airborne bacterial contamination of operative wounds. Western Journal of Medicine 1976; 124: 361-9.

[36] Whyte W, Lytsy B. Ultraclean air systems and the claim that laminar airflow systems fail to prevent deep infections after total joint arthroplasty. The Journal of Hospital Infection 2019; 103: e9-e15. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2019.04.021.

[37] Charnley J. Postoperative infection after total hip replacement with special reference to air contamination in the operating room. Clinical Orthopaedics and Related Research 1972; 87: 167-87. https://doi.org/10.1097/00003086-197209000-00020.

[38] Gastmeier P, Breier AC, Brandt C. Influence of laminar airflow on prosthetic joint infections: a systematic review. The Journal of Hospital Infection 2012; 81: 73-8. https://dx.doi.org/10.1016/j.jhin.2012.04.008.

[399] Brandt C, Hott U, Sohr D, Daschner F, Gastmeier P, Ruden H. Operating room ventilation with laminar airflow shows no protective effect on the surgical site infection rate in orthopedic and abdominal surgery. Annals of Surgery 2008; 248: 695-700. https://dx.doi.org/10.1097/SLA.0b013e31818b757d.

[40] Bischoff P, Kubilay NZ, Allegranzi B, Egger M, Gastmeier P. Effect of laminar airflow ventilation on surgical site infections: a systematic review and meta-analysis. The Lancet Infectious Diseases 2017; 17: 553-61. http://dx.doi.org/10.1016/S1473-3099%2817%2930059-2.

[41] Teo BJX, Woo YL, Phua JKS, Chong HC, Yeo W, Tan AHC. Laminar flow does not affect risk of prosthetic joint infection after primary total knee replacement in Asian patients. Journal of Hospital Infection 2020; 104: 305-8. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhin.2019.12.014.

[42] World Health Organization. Global Guidelines for the Prevention of Surgical Site Infection. 2016.

[43] SSI Diagnostica. Blod agar plate 5%, 9 cm (10 pcs), https://shop.ssidiagnostica.com/blodagarplade-5-9-cm-10-stk.html; [adgang 6. september 2021].

[44] Langvatn H, Schrama JC, Cao G et al. Operating room ventilation and the risk of revision due to infection after total hip arthroplasty: assessment of validated data in the Norwegian Arthroplasty Register. Journal of Hospital Infection 2020; 105: 216-24. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhin.2020.04.010.

[45] Erichsen Andersson A, Petzold M, Bergh I, Karlsson J, Eriksson BI, Nilsson K. Comparison between mixed and laminar airflow systems in operating rooms and the influence of human factors: experiences from a Swedish orthopedic center. American Journal of Infection Control 2014; 42: 665-9. https://doi.org/10.1016/j.ajic.2014.02.001.

[46] Whyte W, Shaw BH, Barnes R. A bacteriological evaluation of laminar-flow systems for orthopaedic surgery. Journal of Hygiene (London) 1973; 71: 559-64. https://doi.org/10.1017/s0022172400046544.

[47] Singh S, Reddy S, Shrivastava R. Does laminar airflow make a difference to the infection rates for lower limb arthroplasty: a study using the National Joint Registry and local surgical site infection data for two hospitals with and without laminar airflow. European Journal of Orthopaedic Surgery and Traumatology 2017; 27: 261-5. http://doi.org/10.1007/s00590-016-1852-1.

[48] Pasquarella C, Pitzurra O, Savino A. The index of microbial air contamination. The Journal of Hospital Infection 2000; 46: 241-56. https://doi.org/10.1053/jhin.2000.0820.

[49] Birgand G, Toupet G, Rukly S et al. Air contamination for predicting wound contamination in clean surgery: A large multicenter study. American Journal of Infection Control 2015; 43: 516-21. https://doi.org/10.1016/j.ajic.2015.01.026.

[50] Rezapoor M, Alvand A, Jacek E, Paziuk T, Maltenfort MG, Parvizi J. Operating Room Traffic Increases Aerosolized Particles and Compromises the Air Quality: A Simulated Study. The Journal of Arthroplasty 2018; 33: 851-5. https://dx.doi.org/10.1016/j.arth.2017.10.012.

[51] Smith EB, Raphael IJ, Maltenfort MG, Honsawek S, Dolan K, Younkins EA. The effect of laminar air flow and door openings on operating room contamination. The Journal of Arthroplasty 2013; 28: 1482-5. https://doi.org/10.1016/j.arth.2013.06.012.

[52] Aganovic A, Cao G, Fecer T et al. Ventilation design conditions associated with airborne bacteria levels within the wound area during surgical procedures: a systematic review. Journal of Hospital Infection 2021; 113: 85-95. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2021.04.022

[53] Odense Universitetshospital. Fremtidens operationsstue - konceptet holder i praksis, https://www.ouh.dk/wm520488; [adgang 6. september 2021].

13 Appendix

Nærværende projekt, bakteriologiske del, har været indsendt til det internationalt anerkendte fagtidsskrift, Journal of Hospital Infections, for godkendelse og til publicering.

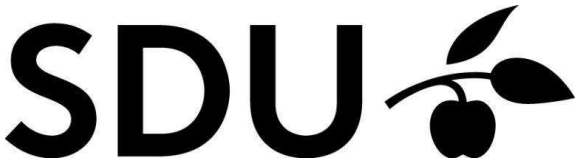
Artiklen er godkendt og blev publiceret i april på deres webside.

I trykt version og i fuld længde, i juli udgaven, nr. 113, af Journal of Hospital Infections, side 65-70.

Af ophavsrettighedsmæssige grunde kan artiklen ikke gengives i nærværende rapport men nedenstående link kan benyttes.

https://doi.org/10.1016/j.jhin.2021.04.019 og https://www.journalofhospitalinfection.com/issue/S0195-6701(21)X0005-9

Manus der ligger til grund for artiklen gengives i stedet nedenfor og er en værdig pendant dertil.



University of Southern Denmark

Laminar Airflow Decreases Microbial Air Contamination Compared to Turbulent Ventilated Operating Theatres During Live Total Joint Arthroplasty – A Nationwide Survey

Journal of Hospital Infection

By:

Rikke Juhl Knudsen
and
Stinna Michelle Nygaard Knudsen

Main supervisor: Søren Overgaard, MD, PhD, Professor

Co-supervisor: Tine Nymark, MD, PhD, Consultant, Associate Professor

Department of Orthopaedic Surgery and Traumatology

Odense University Hospital, OUH

Words in total: 3051 (out of 3200)

Words in abstract: 249 (out of 250)

Abstract

Background: Preventing surgical site infections and prosthetic joint infections is crucial for patient safety after total joint arthroplasty. Microbial air contamination is suggested as a risk factor. Therefore, it is discussed which ventilation system in operating theatres (OT) that will reduce air contamination most effectively.

Aim: To determine whether laminar airflow (LAF) ventilation is superior to turbulent airflow (TAF) ventilation by looking at the colony forming units (CFU) count during live total hip and knee arthroplasties. Furthermore, to explore if the number of OT personnel, door and cabinet lock openings and technical parameters of the ventilation systems have an impact on the number of CFU.

Methods: Active air sampling and passive sedimented bacterial load were performed in 17 OTs, equipped with either LAF or TAF ventilation, during 51 live surgeries while observations were noted.

Findings: LAF OTs reduced CFU counts compared to TAF OTs during live surgery (p-value < 0.001). All LAF OTs provided ultraclean air whereas TAF had nine procedures exceeding the threshold of 10 CFU/m^3. Door and cabinet lock openings and number of personnel did not influence the CFU count, while it decreased with increasing volume and total air change per hour (p-value < 0.05).

Conclusion: All LAF OTs had CFU counts within recommendations and provided lower CFU counts compared to TAF OTs. The number of OT personnel and total openings did not have an influence on CFU counts. Increased volume of the OT and total air change per hour showed a decrease in active CFU counts.

Keywords: Microbial air contamination, operating theatre, laminar airflow, turbulent airflow, colony forming units, air quality

Introduction

Infection-related factors

Surgical site infection (SSI) is a feared complication following total joint arthroplasty that can lead to prosthetic joint infection (PJI), possibly caught in the operating theatre (OT) [1, 2]. Prevention of PJI is crucial, as it may lead to sepsis, re-operation and can potentially be life threatening [3-5].

The risk of SSI has been discussed for more than half a century [1, 6]. It is influenced by several factors, which can be divided into pre-, peri- and postoperative categories [7]. It can be patient related and depend on age, smoking and hygiene. Furthermore, it can relate to surgical procedures including prophylactic antibiotics; number of OT staff and their behaviour; door and cabinet lock openings [1, 6-9]; or to the type of ventilation system and OT air quality [1, 6]. For many years, the air quality in OTs has been thought to play a role in the risk of PJI. It was found that the cleaner air, the fewer infections [1, 5, 6].

Operating theatre ventilation

Overall, two different ventilation systems are used in orthopaedic OTs: the conventional type, also known as turbulent airflow (TAF), and the unidirectional type, laminar airflow (LAF). TAF ventilation dilutes air borne contamination by using filtered clean air in a turbulent airflow. LAF works either vertically above or horizontally on the surgical field, where filtered unidirectional clean air is emitted and thereby pushing away the contaminated air [10-12]. The two ventilation systems are used under the assumption that they provide

ultraclean air, due to the incorporation of high efficiency particulate air (HEPA) filters in the systems for injection of air into the OT, which may minimize the risk rate of SSI. It is debated which ventilation system is optimal for reducing colony forming units (CFU), SSI and related PJI, since different studies have found contradicting results. Some recommend LAF because studies have shown that when orthopaedic surgeries are performed in ultraclean LAF ventilated rooms, fewer infections occur [1, 3, 6, 13-16]. Other studies do not find a difference between LAF and TAF, while some find that LAF has higher infection rates [17-21], thus establishing the benefits of using TAF systems. It remains unclear which system is preferable when looking at the current literature and the contradictory findings, while also taking the cost-efficiency into account.

Thus, our aim of this study is to determine whether LAF is superior to TAF ventilation by looking at the CFU count during live total hip and knee arthroplasties. Furthermore, we want to explore if the number of OT personnel, door and cabinet lock openings and technical parameters of the ventilation systems had an impact on the number of CFU. Our hypothesis is that the use of LAF results in lower CFU count than TAF ventilation.

Methods

This observational study was conducted between March 2017 and July 2020 in 15 hospitals throughout Denmark. Eligible hospitals were those that had a significant number of surgeries done according to the two national registers of total hip and knee arthroplasties, met the ISO classification 5 and/or met the national guidelines (Figure 1). The study was reported according to STROBE guideline [22].

Air sampling and passive sedimentation were performed in 12 OTs with LAF and 5 OTs with TAF ventilation during live surgeries. The LAF ventilated OTs were of the vertical type. The OTs were evaluated in accordance with the ISO standard (DS/EN ISO 14644-1:2015). The recommendation for the air quality in OTs is that they comply with the ISO standard and the recommendations which includes a CFU count not exceeding 10 CFU/m^3 during surgery [7, 23].

Active sampling

Active air sampling expressed as CFU/m^3 was performed during each operation in three different positions (Figure 2). An air sampler (Spin Air IUL-5500) with a flow rate of 100 l/min in 10 minutes resulting in one m^3 of air over each 90 mm agar plate containing 5 % horse blood [24] was used. The first position was by the surgical instrumentation trolley, starting when the joint was opened. The air sampler was located by the centre of the trolley, 5 cm from and at the level of the trolley. The second position was 30 cm from and at the level of the surgical wound, starting when the femur was prepared. The third position was 30 cm above the patient table where the joint was located during surgery and the measurement was conducted 30 minutes after cleaning of the empty and vacated OT.

Passive sampling on agar settle plates

Passive sedimentation on agar plates was conducted on three locations in the periphery of the LAF area during operation (Figure 2). In TAF OTs the plates were correspondingly positioned as in a LAF OT. The measurement lasted from surgical incision to time of wound closure. The values were proportioned to one hour and expressed as CFU/m^2/h.

For each surgical procedure one unexposed settle plate served as control for correct handling, transportation and storage. All settle plates were read after incubation for 48 hours at 35 degrees Celsius. No identification of species was performed.

Attires and behaviour of OT personnel

All personnel were wearing barrier scrub suits. Scrubbed staff and the observer who handled the active air sampling wore single use sterile surgical attire. Specifically, a sterile gown (EN 13795 HP 3); a sterile hood; a surgical mask; and two pairs of sterile gloves were used [7]. The non-scrubbed personnel wore non-sterile attire, which refers to a surgical cap and a surgical mask. There was no recommendation for wearing a surgical mask as an anaesthesiology nurse. The number of door and cabinet lock openings as well as the number of personnel and their attire were noted during surgery. Cabinet lock refers to a minor lock system in the wall of the OT, enabling transfer of surgical utensils. Cabinet locks are used to minimize the contamination that door openings produce. However, it cannot be established that the cabinet locks are used correctly and are not instead used as social interaction between OT personnel and outside staff. Therefore, it can be argued that door and cabinet lock openings can be merged into one variable, namely total openings.

Technical evaluation

The measurements for area and volume were applied by a laser meter (Hilti® PD22). LAF velocity and total air volume were assessed by two methods. One method measures total injected airflow and subcategories in adjoining ventilation duct system to the OT and LAF with a calibrated VelociCalc Multi-Function Ventilation Meter (TSI® 9565-P), creating an average for each 5 second sample time, and an average for the total samples. Measured value, according to EN12599, divided with measured/calculated LAF area thus provided the LAF velocity. This method was used when the system had an external LAF fan or air handling unit. The other method was assessing test data from the annual check report according to DS/EN 14644-3, B-2 and was used where LAF had built-in internal fan. Outdoor air to the OT was always measured by the former method with the TSI® 9565-P regardless of the ventilation type.

Maximum positive air pressure was assessed with a pitot tube rigged for static pressure measurement and connected to calibrated TSI® 9565-P, measured during closed OT situation in operational modus normally through an existing slot, creating an average for each 5 second sample time, and an average for the total samples.

The type of filter was registered by inspection on-site, annual test report according to DS/EN 14644 or filter list from the technical department.

Statistical analyses

Continuous variables were described as median, 95 % confidence interval (95 % CI) and range. Due to non-parametric data we conducted a Mann-Whitney U test to examine the difference between LAF and TAF ventilated OTs.

The impact of number of OT personnel, door and cabinet lock openings and the ventilation specifications had on CFU count was analysed by two series of negative binomial regression analyses, one for data obtained per operation, and one for data obtained per OT. Each series consisted of two analyses, one using the active bacterial count as dependant variable and one using the passive bacterial sedimentation load. The model based on data from each operation explored the effect of number of total openings and personnel on

the CFU count. The model based on data from each OT explored the effect of total air change per hour, volume of the OT and the maximum pressure on CFU count. All models explored the effect of LAF ventilation relative to TAF ventilation by adding a binary variable. Negative binomial regression was chosen over Poisson regression because of overdispersion of the CFU counts [25, 26]. Correlation between LAF velocity and CFU count was evaluated using Spearman's correlation coefficient. A p-value less than 0.05 indicating statistical significance was chosen. The statistical analysis was conducted by using STATA IC16 software (College Station, TX - StataCorp LLC).

Results

Out of 19 eligible hospitals 15 ended up participating contributing with a total of 17 OTs and 51 arthroplasties (Figure 1). Thirty-five arthroplasties were conducted in 12 OTs equipped with LAF and 16 conducted in OTs with TAF ventilation. Three of the included OTs did not meet the ISO classification 5. One met the ISO classification 6 and two OTs in the same hospital did not have measurements of particles but air sampling at rest. One operation was omitted due to failure in the part of the ventilation systems that extracts the air from the OT.

Regarding the number of personnel and the duration of the operations there was nearly no difference in the median value in the different settings (Table I). The minimum amount of door openings was 0 for both types of OTs and the maximum amount was 9, observed in LAF OTs. Cabinet lock openings ranged from 0 in both types of OTs to 8 in LAF OTs (Table II). In empty OTs, a median value of 0 and 1 CFU/m^3 was found in LAF and TAF OTs, respectively (Table I). The specifications of the ventilation systems are presented in a subsequent appendix A (Table A.1) and the filter characteristics in appendix B (Table B.1).

LAF vs. TAF ventilation

Both active air sampling ($p < 0.001$) and passive bacterial sedimentation ($p < 0.001$) had lower CFU counts in LAF OTs compared to TAF ventilated OTs (Table I). All active air sampling collected in LAF OTs was below the recommended threshold of 10 CFU/m^3 (Table II). Nine out of the 16 (56.3 %) arthroplasties conducted in TAF OTs exceeded the threshold.

Our results showed that neither the number of personnel nor the number of total openings showed a significant impact on the CFU count. Regarding the technical parameters, our results showed that for every 1 m^3 increase in the volume of the OT, the active CFU counts decreased significantly by 2.4 % (p-value < 0.05), while holding all other variables constant. Our results also predicted that for every 1 total air change per hour increase the active CFU counts decreased significantly by 2.4 % (p-value < 0.05). The variables predicting the passive CFU count did not show any significant impact.

No statistically significant correlation was found between active or passive CFU count and LAF velocity.

Discussion

The purpose of this study was to determine CFU counts in LAF and TAF ventilated OTs and to evaluate the significance of the number of OT personnel, door and cabinet lock openings and technical parameters of the ventilation systems and their impact on the CFU count during live total hip and knee arthroplasties. Our study showed that LAF ventilated OTs reduced CFU count both by active air sampling and passive bacterial sedimentation load compared to TAF OTs. LAF OTs had better air quality with all active air sampling below

the recommended threshold of 10 CFU/m^3 while the CFU count exceeded the threshold in nine arthroplasties conducted in TAF OTs. These results are in line with our hypothesis and with earlier studies favouring LAF [1, 11, 27, 28]. Moreover, we showed that an increase in the size of the OT or the total air change per hour would decrease the active CFU count. Our results showed that neither the number of personnel nor the number of total openings showed a significant impact on the CFU count. Furthermore, no correlation was found between active or passive CFU count and LAF velocity. Our technical data (Table A.1) may partly explain why some TAF OTs did not meet the recommended threshold of CFU counts. It may be explained by the type of filters that the TAF OTs were equipped with, which are of lower quality than those provided in the included LAF OTs.

Several studies have been conducted with contradictory results. During the last decade, some studies have been questioning the advantage of LAF in reducing infection [17-19, 29]. It may be explained by development and optimization of the ventilation systems or the type of method used as well as the design of the study.

We found it important to measure during real life surgery and to use a surrogate endpoint for the risk of SSI. To measure SSI would require a much larger sample size to meet the large differences in patients because of patient-related factors that can possibly influence the outcome. The use of passive bacterial sedimentation load was studied and approved by Pasquarella [30], who also implies that different types of active air samplers provide different values of CFU counts, even when they are used at the same place at the same time. Our study uses both methods of collecting CFU counts. Regardless of which method used our results still favours LAF OTs.

Our results are in line with Andersson [27] who finds that LAF ventilated OTs offer high quality air with low levels of CFUs accessed by active air sampling during live surgery. Langvatn [11] supports high volume vertical LAF ventilated OTs by finding a lower risk of revision due to PJI compared to surgeries performed in TAF ventilated OTs. A high volume vertical LAF ventilation is provided by a larger air change per hour, this is in line with our results showing that a larger air change per hour decreases the CFU count although we have different endpoints. In contrast, Bischoff [19] does not find benefit of LAF ventilated OTs relative to reduce the risk of SSI. This study is the foundation of the WHO guideline [21], which has been discussed and criticized by Whyte [15] among others questioning the quality of the evidence.

We believe that CFU count is a valid predictor for PJI as Birgand [31] and Lidwell [5] have shown correlation between the level of microbial air contamination and the incidence of joint sepsis. Thus, they suggest that the CFU count can be used as a parameter to assess the risk of infection. This implies that according to the results of our study, LAF is optimal for minimizing the risk of SSI.

The cleanliness of the air in the OT results from a complex system of door and cabinet lock openings, number and behaviour of OT personnel as well as the type of ventilation system. Furthermore, the impact of door openings may differ due to whether the door opens to a corresponding room with equivalent ventilation and pressure or not. During our study, the number of personnel and door openings were mostly kept to a minimum, and cabinet locks were used instead when possible. Rezapoor [32] shows that movement of personnel and door openings in OTs results in more air contamination but also that LAF ventilation protects against this. Smith [33] supports that door openings significantly increase air contamination and that LAF ventilation decreases CFU counts. This is in accordance with our findings as all the included active CFU counts of the LAF OTs were below the recommended threshold of 10 CFU/m^3 despite OT traffic. In contrast, our study cannot support that openings of doors and cabinet locks as well as number of personnel have a significant impact on the CFU counts. This may be explained by the fact that these variables did not differ a lot between the different operations.

The design and features of the ventilation systems in our study differ between hospitals and may influence the air quality of the OTs. We showed with an increase in the volume of the OT, the CFU counts significantly decreased. This may be explained by that a larger volume of the OT the more space to dilute any CFU present.

Our study has several limitations. The sample size is rather low in particular regarding TAF OTs. However the results were clear and in line with our mock study showing that LAF ventilation had reduced CFU count compared to TAF [34]. To relate our study to a clinical aspect, the type of bacteria should have been established. Thus, the bacterial species could be compared to those seen most commonly in joint sepsis, and it could be determined whether they were important and possibly could be part of the cause of infection.

As a strength of our study, we have observed and collected the data in a natural setting without interference and therefore we consider our results to be representative of live surgery.

In conclusion our study showed that LAF ventilated OTs reduced CFU counts compared to TAF OTs during live joint arthroplasties. All LAF OTs provided ultraclean air with active CFU count below 10 CFU/m^3 whereas TAF had nine procedures exceeding the threshold. The behaviour of OT personnel including number of OT personnel and total openings did not have an influence on CFU counts. Increased volume of the OT and total air change per hour resulted in a decrease of active CFU counts.

In perspective, the study supports the fact that LAF reduced the air contamination during live surgery which is suggested to be a risk of SSI. Creating an operation field with low air contamination is needed for patient safety. Our findings suggest that when building new OTs, the quality of the ventilation system and the size of the OT should be considered.

Acknowledgements

The authors wish to thank all participating hospitals, the infection control nurses who helped with set up of the equipment, the department of Microbiology (OUH) who analyzed the agar plates, statistician Birgit Debrabant and language consultant Signe Knudsen.

Conflict of interest

None.

Source of funding

This study was funded by ELFORSK, who is part of the Danish Energy Agency.

References

[1] Charnley J, Eftekhar N. *Postoperative infection in total prosthetic replacement arthroplasty of the hip-joint. With special reference to the bacterial content of the air of the operating room*. British Journal of Surgery 1969; **56**: 641-9. https://doi.org/10.1002/bjs.1800560902.
[2] Dale H, Fenstad AM, Hallan G *et al. Increasing risk of prosthetic joint infection after total hip arthroplasty*. Acta Orthopaedica 2012; **83**: 449-58. https://doi.org/10.3109/17453674.2012.733918.

[3] Lidwell OM, Elson RA, Lowbury EJ *et al. Ultraclean air and antibiotics for prevention of postoperative infection. A multicenter study of 8,052 joint replacement operations*. Acta Orthopaedica Scandinavica 1987; **58**: 4-13. https://doi.org/10.3109/17453678709146334.
[4] Gundtoft PH, Pedersen AB, Varnum C, Overgaard S. *Increased Mortality After Prosthetic Joint Infection in Primary THA*. Clinical Orthopaedics and Related Research 2017; **475**: 2623-31. https://doi.org/10.1007/s11999-017-5289-6.
[5] Lidwell OM, Lowbury EJ, Whyte W, Blowers R, Stanley SJ, Lowe D. *Airborne contamination of wounds in joint replacement operations: the relationship to sepsis rates*. The Journal of Hospital Infection 1983; **4**: 111-31.
[6] Charnley J. *A STERILE-AIR OPERATING THEATRE ENCLOSURE*. British Journal of Surgery 1964; **51**: 195-202. https://doi.org/10.1002/bjs.1800510308.
[7] Central Enhed for Infektionshygiejne. Nationale infektionshygiejniske retningslinjer. 2 edn. Statens Serum Institut; 2020.
[8] Agodi A, Auxilia F, Barchitta M *et al. Operating theatre ventilation systems and microbial air contamination in total joint replacement surgery: results of the GISIO-ISChIA study*. The Journal of Hospital Infection 2015; **90**: 213-9. https://dx.doi.org/10.1016/j.jhin.2015.02.014.
[9] Cristina ML, Sartini M, Schinca E, Ottria G, Spagnolo AM. *Operating room environment and surgical site infections in arthroplasty procedures*. Journal of Preventive Medicine and Hygiene 2016; **57**: E142-E8.
[10]Jain S, Reed M. *Laminar Air Flow Handling Systems in the Operating Room*. Surgical Infections 2019; **20**: 151-8. http://dx.doi.org/10.1089/sur.2018.258.
[11] Langvatn H, Schrama JC, Cao G *et al. Operating room ventilation and the risk of revision due to infection after total hip arthroplasty: assessment of validated data in the Norwegian Arthroplasty Register*. Journal of Hospital Infection 2020; **105**: 216-24. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhin.2020.04.010.
[12] Cao G, Nilssen AM, Cheng Z, Stenstad LI, Radtke A, Skogås JG. *Laminar airflow and mixing ventilation: Which is better for operating room airflow distribution near an orthopedic surgical patient?* American Journal of Infection Control 2019; **47**: 737-43. https://doi.org/10.1016/j.ajic.2018.11.023.
[13] Lidwell OM, Lowbury EJ, Whyte W, Blowers R, Stanley SJ, Lowe D. *Effect of ultraclean air in operating rooms on deep sepsis in the joint after total hip or knee replacement: a randomised study*. British Medical Journal (Clinical research ed) 1982; **285**: 10-4.
[14] Alexakis PG, Feldon PG, Wellisch M, Richter RE, Finegold SM. *Airborne bacterial contamination of operative wounds*. Western Journal of Medicine 1976; **124**: 361-9.
[15] Whyte W, Lytsy B. *Ultraclean air systems and the claim that laminar airflow systems fail to prevent deep infections after total joint arthroplasty*. The Journal of Hospital Infection 2019; **103**: e9-e15. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2019.04.021.
[16] Charnley J. *Postoperative infection after total hip replacement with special reference to air contamination in the operating room*. Clinical Orthopaedics and Related Research 1972; **87**: 167-87. https://doi.org/10.1097/00003086-197209000-00020.
[17] Gastmeier P, Breier AC, Brandt C. *Influence of laminar airflow on prosthetic joint infections: a systematic review*. The Journal of Hospital Infection 2012; **81**: 73-8. https://dx.doi.org/10.1016/j.jhin.2012.04.008.
[18] Brandt C, Hott U, Sohr D, Daschner F, Gastmeier P, Ruden H. *Operating room ventilation with laminar airflow shows no protective effect on the surgical site infection rate in orthopedic and abdominal surgery*. Annals of Surgery 2008; **248**: 695-700. https://dx.doi.org/10.1097/SLA.0b013e31818b757d.
[19] Bischoff P, Kubilay NZ, Allegranzi B, Egger M, Gastmeier P. *Effect of laminar airflow ventilation on surgical site infections: a systematic review and meta-analysis*. The Lancet Infectious Diseases 2017; **17**: 553-61. http://dx.doi.org/10.1016/S1473-3099%2817%2930059-2.
[20] Teo BJX, Woo YL, Phua JKS, Chong HC, Yeo W, Tan AHC. *Laminar flow does not affect risk of prosthetic joint infection after primary total knee replacement in Asian patients*. Journal of Hospital Infection 2020; **104**: 305-8. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhin.2019.12.014.
[21] World Health Organization. Global Guidelines for the Prevention of Surgical Site Infection. 2016.

[22] von Elm E, Altman DG, Egger M, Pocock SJ, Gotzsche PC, Vandenbroucke JP. The Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology (STROBE) Statement: guidelines for reporting observational studies, https://www.equator-network.org/reporting-guidelines/strobe/; [accessed 28. December 2020].
[23] Cleanroom Testing & Services Sdn. Bhd. Cleanroom standards, http://ctssb.net/cleanroom_standards.php; [accessed 07. January 2020].
[24] SSI Diagnostica. Blod agar plate 5%, 9 cm (10 pcs), https://shop.ssidiagnostica.com/culture-media-and-reagents/agarplader-9-cm/blodagarplade-5-9-cm-10-stk.html; [accessed 07. December 2020].
[25] Hilbe JM. Negative Binomial Regression, 2 edn. Cambridge, UNITED KINGDOM: Cambridge University Press 2011.
[26] Shengping Y, Gilbert B. *The Negative Binomial regression*. The Southwest Respiratory and Critical Care Chronicles 2015; **3**.
[27] Erichsen Andersson A, Petzold M, Bergh I, Karlsson J, Eriksson BI, Nilsson K. *Comparison between mixed and laminar airflow systems in operating rooms and the influence of human factors: experiences from a Swedish orthopedic center*. American Journal of Infection Control 2014; **42**: 665-9. https://doi.org/10.1016/j.ajic.2014.02.001.
[28] Whyte W, Shaw BH, Barnes R. *A bacteriological evaluation of laminar-flow systems for orthopaedic surgery*. Journal of Hygiene (London) 1973; **71**: 559-64. 10.1017/s0022172400046544.
[29] Singh S, Reddy S, Shrivastava R. *Does laminar airflow make a difference to the infection rates for lower limb arthroplasty: a study using the National Joint Registry and local surgical site infection data for two hospitals with and without laminar airflow*. European Journal of Orthopaedic Surgery and Traumatology 2017; **27**: 261-5. 10.1007/s00590-016-1852-1.
[30] Pasquarella C, Pitzurra O, Savino A. *The index of microbial air contamination*. The Journal of Hospital Infection 2000; **46**: 241-56. https://doi.org/10.1053/jhin.2000.0820.
[31] Birgand G, Toupet G, Rukly S *et al. Air contamination for predicting wound contamination in clean surgery: A large multicenter study*. American Journal of Infection Control 2015; **43**: 516-21. https://doi.org/10.1016/j.ajic.2015.01.026.
[32] Rezapoor M, Alvand A, Jacek E, Paziuk T, Maltenfort MG, Parvizi J. *Operating Room Traffic Increases Aerosolized Particles and Compromises the Air Quality: A Simulated Study*. The Journal of Arthroplasty 2018; **33**: 851-5. https://dx.doi.org/10.1016/j.arth.2017.10.012.
[33] Smith EB, Raphael IJ, Maltenfort MG, Honsawek S, Dolan K, Younkins EA. *The effect of laminar air flow and door openings on operating room contamination*. The Journal of Arthroplasty 2013; **28**: 1482-5. https://doi.org/10.1016/j.arth.2013.06.012.
[34] Rosenbeck K, Nielsen L, Clausen G *et al.* OP Vent - Energieffektiv ventilation på operationsstuer, https://elforsk.dk/projektdatabase/op-vent-energieffektiv-ventilation-pa-operationsstuer; 2015 [accessed 07. December 2020].
[35] EMW filtertechnik GmbH. ISO 29463 - New test standard for HEPA Filters, https://www.emw.de/en/filter-campus/iso29463.html; [accessed 27. October 2020].
[36]Eurovent Association. Selection of EN ISO 16890 rated air filter classes, https://eurovent.eu/?q=content/eurovent-423-2018-selection-en-iso-16890-rated-air-filter-classes-second-edition; 2018 [accessed 03. November 2020].

Tables

Table I: Characteristics of the operating theatres by the type of ventilation system. 95 % CI, 95 % confidence interval.

		Median	95 % CI	Range
LAF	Empty [CFU/m^{-3}]	0	-0.52-2.18	0-7
	Active air sampling [CFU/m^{-3}]	0.5	0.51-1.37	0-4
	Passive bacterial sedimentation [CFU/m^{-2}/h]	0	16.12-58.34	0-246.6
	Surgical time [min]	59.5	56.79-65.80	44-95
	Number of personnel	7	7.19-7.81	7-10
	Number of total openings	1	1.33-3.55	0-13
	Volume [m^{-3}]	128.5	115.63-154.04	99-187
	Total air change per hour [no./h]	87	68.64-97.86	36-120
	Maximum positive pressure [Pa]	13.85	9.29-18.71	1.6-28
	LAF velocity [m/s]	0.34	0.27-0.36	0.18-0.41
	LAF area [m^{-2}]	9	7.96-9.88	6.01-10.88
TAF	Empty [CFU/m^{-3}]	1	-0.32-2.52	0-2.5
	Active air sampling [CFU/m^{-3}]	14.25	10.34-22.16	1-34.5
	Passive bacterial sedimentation [CFU/m^{-2}/h]	228.59	123.68-357.18	0-898.2
	Surgical time [min]	59	50.39-71.98	35-105
	Number of personnel	8	7.2-8.1	7-10
	Number of total openings	2	0.97-3.15	0-7
	Volume [m^{-3}]	134	116.3-165.62	122-173
	Total air change per hour [no./h]	16	9.37-32.23	14-36
	Maximum positive pressure [Pa]	16.7	7.23-24.65	7.5-26

Table II: Number of personnel in the operating theatres, door and cabinet lock openings, surgical time and air contamination by type of ventilation system. OP no., operation number; CFU, colony forming units.

Hospital	OP no.	Air sampling [CFU/m^3]	Sedimenting bacterial load [CFU/m^2/h]	Surgical time [min]	No. of personnel	No. of sterile personnel	Door openings	Cabinet lock openings
Laminar airflow								
1	Empty	0	-	-	-	-	-	-
	1	0.5	157.2	80	7	4	5	8
	2	1	68.3	46	7	4	0	2
	3	0	165.5	95	7	4	0	2
2	Empty	7	-	-	-	-	-	-
	1	9	41.4	76	8	4	0	4
	2	2	91.1	69	10	4	1	5
	3	3.5	0	59	10	4	0	2
3	Empty	0	-	-	-	-	-	-
	1	2.5	0	63	7	4	0	1
	2	0	0	68	7	4	0	0
	3	0	0	50	7	4	0	2
4	Empty	0	-	-	-	-	-	-
	1	0	0	60	8	4	0	4
	2	2.5	0	53	8	4	0	3
	3	1.5	116.4	54	7	4	0	3
5	Empty	0	-	-	-	-	-	-
	1	1	0	49	8	4	0	1
	2	0	0	67	9	4	3	4
	3	0.5	37.4	84	9	4	4	1
6	Empty	0	-	-	-	-	-	-
	1	0.5	0	50	7	4	0	0
	2	0	0	55	7	4	0	0
	3	0	0	62	8	4	1	2
	4	1	0	57	7	4	0	0
7	Empty	0	-	-	-	-	-	-
	1	0	87.3	72	7	4	0	0
	2	0	92.5	68	7	4	0	0
	3	0.5	0	54	7	4	0	0
8	Empty	3	-	-	-	-	-	-
	1	1.5	52.4	60	7	4	9	1
	2	0	37.9	83	7	4	5	2
	3	0	44.9	70	7	4	5	1
9	Empty	0	-	-	-	-	-	-
	1	0	0	87	7	4	0	1
	2	0	0	60	7	4	0	0
10	Empty	0	-	-	-	-	-	-
	1	0	0	45	7	4	0	0
	2	2.5	0	54	7	4	0	1
	3	4	0	63	7	4	0	1
	4	2	246.6	51	7	4	3	0
11	Empty	0	-	-	-	-	-	-

	1	0.5	0	44	7	4	0	0
	2	4	68.3	46	7	4	0	0
12	Empty	0	-	-	-	-	-	-
	1	0	0	56	8	4	0	0
	2	0.5	0	50	9	5	0	0
Turbulent airflow								
1	Empty	0	-	-	-	-	-	-
	1	9	209.6	60	7	4	5	0
	2	9	221.4	71	7	4	1	0
	3	22	54.2	58	7	4	3	0
2	Empty	2	-	-	-	-	-	-
	1	34.5	524	48	7	4	0	0
	2	23.5	235.8	40	7	4	0	1
	3	22	0	39	7	4	0	0
3	Empty	1	-	-	-	-	-	-
	1	9	238.8	79	7	4	0	0
	2	14.5	129.6	97	7	4	0	2
4	Empty	0	-	-	-	-	-	-
	1	4	29.9	105	10	4	3	2
	2	6	134.7	70	8	4	5	2
	3	1	55.2	57	8	4	1	1
5	Empty	2	-	-	-	-	-	-
	1	33	898.2	35	8	5	0	2
	2	21.5	309.2	61	8	5	0	0
	3	14	318.9	69	8	5	2	0
	Empty	3	-	-	-	-	-	-
	4	4	251.5	50	8	5	1	1
	5	33	235.8	40	8	5	1	0

Figures

Figure 1: Flowchart outlining the selection of hospitals.

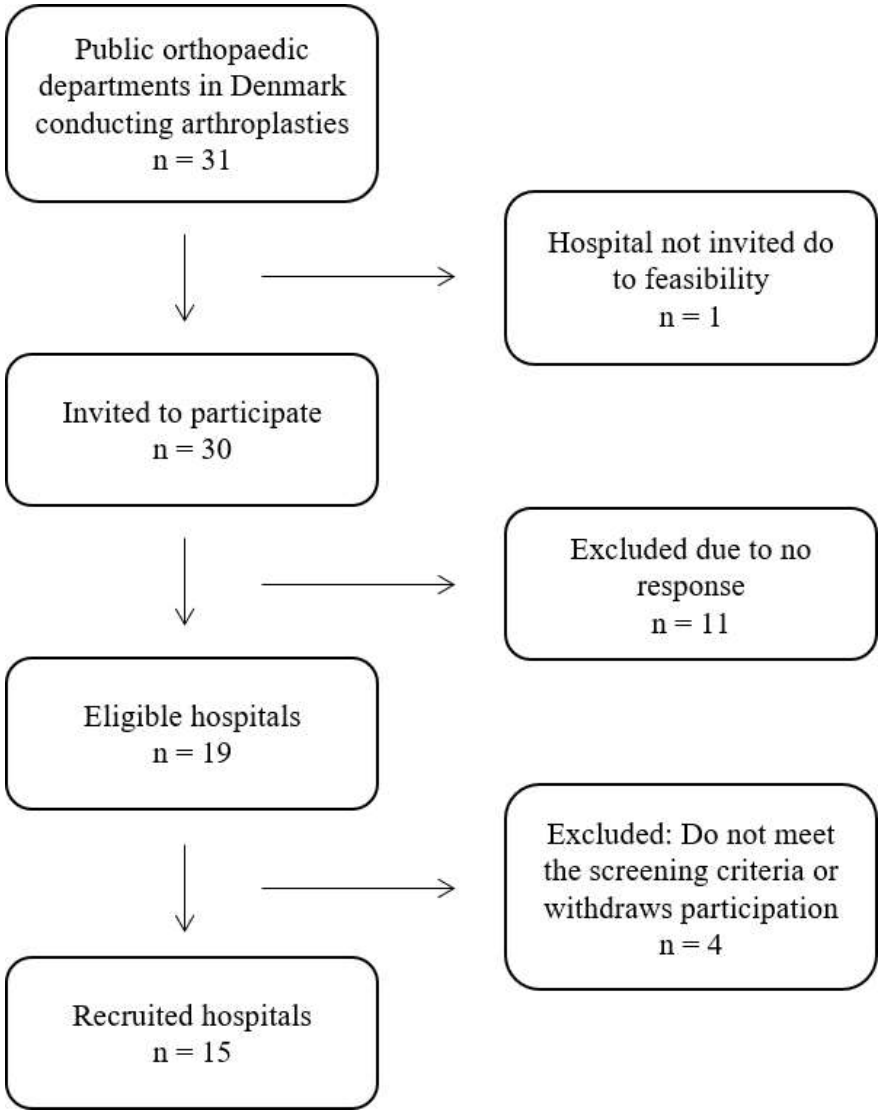


Figure 2: An example of operating theatre set up.

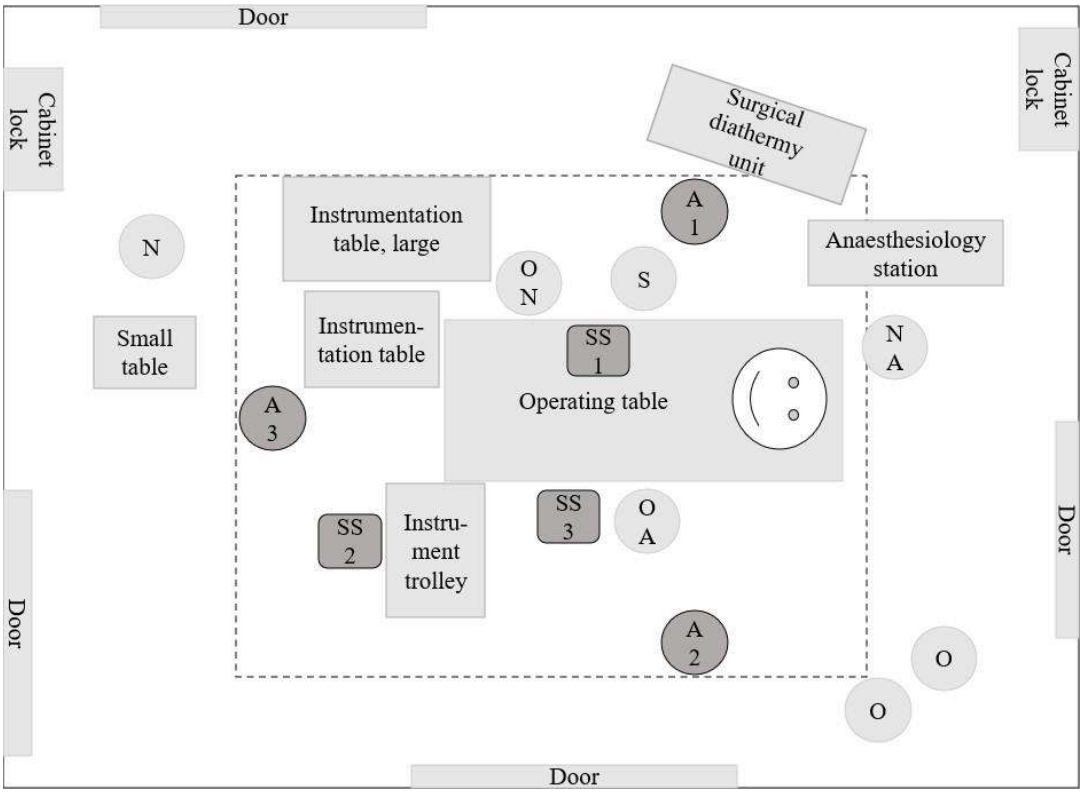


Figure Legends

Figure 1: OT, operating theatre. Out of 30 invited hospitals 15 hospitals in Denmark were included and thereby 51 total joint arthroplasties were performed. Thirty-five operated on OTs equipped with laminar airflow ventilation (68.6 %) and 16 equipped with turbulent airflow ventilation (31.4 %).

Figure 2: AX, agar plate no. X; SSX, slit sampler no. X; S, surgeon; OA, operation assistant; ON, operation nurse; N, nurse; NA, nurse anaesthetist; O, observant, the dotted line corresponds to the laminar airflow field. Turbulent airflow operating theatres had a similar setup despite the laminar airflow field. Typically, the operating theatres was equipped with three doors, but their positions differed among the operating theatres, here the doors represent possible positions.

Appendix A

Table A.1: Specifications of operating theatres and their ventilation type. OT, operating theatre; LAF, laminar airflow; TAF, turbulent airflow.

OT	LAF/ TAF	Theatre specifications		Type of filter	LAF velocity [m/s]	LAF area [m^2]	Total air volume [m^3/h]			Total air change per hour [no./h]	Max positive pressure [Pa]
		Area [m^2]	Volume [m^3]				LAF recirculated incl. possibly injected fresh outdoor air	LAF fresh outdoor air	Infusion directly to the OT		
1	LAF	47	149	H13	0.40	6.01	12,383	758	0	83	13.7
2	LAF	39	109	H14	0.18	8.70	5832	2079	0	54	11
3	LAF	43	128	H13	0.39	9	12,516	1714	0	98	13
4	LAF	33	99	H14	0.30	9	9869	2913	0	100	14.3
5	LAF	38	106	H13	0.35	8.32	9574	1746	0	90	1.6
6	LAF	62	187	H13	0.35	9	12,511	2378	0	67	26.8
7	LAF	58	184	H14	0.23	6.25	6544	2398	0	36	11
8	LAF	43	129	H13	0.23	9.95	8100	0	1310	73	14
9	LAF	40	107	H14	0.35	10.23	12,890	3876	0	120	15
10	LAF	47	136	H14	0.33	10.23	11,700	1429	0	86	5.6
11	LAF	44.3	120	H14	0.27	10.88	10,575	2084	0	88	14
12	LAF	57	164	H13	0.41	9.30	17,023	3265	0	104	28
1	TAF	41	122	H14	-	-	-	-	4392	36	11.5
2	TAF	40	134	F9	-	-	-	-	1994	15	7.5
3	TAF	38	130	F9	-	-	-	-	1834	14	16.7
4	TAF	58	173	H13	-	-	-	-	3915	23	18
5	TAF	48.6	145.8	H11	-	-	-	-	2341	16	26

Appendix B

Table B.1: Filtration type, classification and specifications[35]. MPPS, most penetrating particle size; Em, average efficiency; ePM$_x$, average efficiency on particulate matter ≤ the size of X µm.

Filter class according to EN 1822	Filter groups according to ISO 29463	Overall efficiency on MPPS	Local efficiency on MPPS
E11 (H11)	ISO 15 E	≥ 95 %	-
	ISO 20 E	≥ 99 %	-
H13	ISO 35 H	≥ 99.95 %	≥ 99.75 %
	ISO 40 H	≥ 99.99 %	≥ 99.95 %
H14	ISO 45 H	≥ 99.995 %	≥ 99.975 %
	ISO 50 H	≥ 99.999 %	≥ 99.995 %

Filter class according to EN 779	Average efficiency for particle size 0.4 µm	Filter classification according to ISO 16890[36]		
F9	≥ 95 %	ePM$_1$ 80-90 %	ePM$_{2.5}$ 85-95 %	ePM$_{10}$ 90-100 %