Analyse af luftstrømningsforhold i naturligt ventileret lavenergibolig med kølebehov



Kandidatspeciale Indeklima og Energi Rasmus Vinther Christensen & Kasper Fonnesbæk Aalborg Universitet, juni 2014

Institut for Byggeri & Anlæg

Sohngårdsholmsvej 57 9000 Aalborg Telefon: 99 40 85 32 www.bsn.aau.dk

Tema:

Ventilationskøling i lavenergiboliger

Titel:

Analyse af luftstrømningsforhold i naturligt ventileret lavenergibolig med kølebehov

Projektperiode:

Indeklima og Energi, Afgangsprojekt 2. september 2013 - 6. juni 2014

Projektforfattere:

Rasmus Vinther Christensen Kasper Fonnesbæk

Vejledere:

Per Kvols Heiselberg Michal Pomianowski

Oplagstal: 5

Sidetal: 197

Bilagsantal: 13

Bilags-DVD: 1

Afsluttet: 06-06-2014



AALBORG UNIVERSITET STUDENTERRAPPORT

Synopsis:

Følgende rapport omhandler en analyse og sammenligning af analytiske strømningsligninger med CFD-simuleringer af luftstrømningsforhold i en lavenergibolig ved anvendelse af naturlig ventilation.

Rapporten indledes med en evaluering af indeklimaet i Bolig for livet ved målinger af boligens inde- og udeklimaforhold. Herefter undersøges kølebehovet i boligens centrale opholdsrum, køkken-alrummet, ved opstilling og analyse af termiske simuleringsmodeller med naturlig ventilation. Simuleringsmodellerne af de termiske forhold i køkkenalrummet anvendes til udvælgelsesprocessen af 10 typiske situationer med kølebehov, som analyseres ud fra to overordnede ventilationsstrategier. For hver situation med kølebehov i køkken-alrummet analyseres 10 forskellige vinduesudluftningsscenariers indvirken på lufthastigheds-, lufttemperatur- og luftstrømningsforhold i rummet ved anvendelse af analytiske/empiriske strømningsligninger og CFD-simuleringer.

Forord

Rapporten er resultatet af et kandidatspeciale på civilingeniøruddannelsen i Indeklima og Energi på Institut for Byggeri & Anlæg ved Aalborg Universitet. Rapporten er udarbejdet i efteråret 2013 og foråret 2014. Temaet for rapporten er *Ventilationskøling i boliger*, og titlen er *Analyse af luftstrømningsforhold i naturligt ventileret lavenergibolig med kølebehov*.

Læsevejledning

I rapporten er kildehenvisningerne anført, således at i teksten refereres til bøger med [Efternavn, År], til standarder og anvisninger refereres med [Titel, År] og til hjemmesider refereres med [Hjemmesidens navn, År]. Kilderne vil under Litteratur være fuldstændige. Her angives bøger med forfatter, titel, udgave og forlag, mens internetsider angives med forfatter, titel og år. Hvis ingen kilde er angivet, har projektgruppen selv udarbejdet det pågældende materiale og ved dokumentation henvises til Bilags-CD, som er vedhæftet bagerst i rapporten. Figurer og tabeller er nummereret i henhold til kapitel og forklarende tekst vises under illustrationen. Bilags-CD'en er opbygget af mapper navngivet efter tilhørende kapitel. I mapperne findes beregninger, simuleringsmodeller og resultater for det pågældende kapitel. Litteraturlisten kan findes bagerst i rapporten umiddelbart før bilag.

Rasmus Vinther Christensen

Kasper Fonnesbæk

Indholdsfortegnelse

Kapitel	1 Indledning 1
1.1	Problemanalyse
1.2	Problemafgrænsning 3
1.3	Problemformulering
Kapitel	2 Bolig for livet 5
2.1	Bolig for livet
2.2	Styringsstrategier for tekniske installationer
2.3	Udeklima
2.4	Evaluering af målt indeklima i køkken-alrummet 10
Kapitel	3 Analyse af termisk simuleringsmodel 15
3.1	Opsætning af termisk simuleringsmodel
3.2	Sammenligning af målt og simuleret indeklima 34
Kapitel	4 Kølebehovet i køkken-alrummet 41
4.1	Køkken-alrummets geometri
4.2	Evaluering af kølebehov i køkken-alrummet43
Kapitel	5 Luftstrømningsforhold ved analytiske strømningsligninger 51
5.1	Luftfordelingsprincip
5.2	Ventilationsprincip
5.3	Ventilationsstrategier for vinduesudluftningsscenarierne
5.4	Strømningsligninger
5.5	Ventilationsstrategi 1 - facadevinduer
5.6	Ventilationsstrategi 2 - tagvinduer 61
5.7	Resultater for vinduesudluftningsscenarier 63
Kapitel	6 Numerisk modellering af luftstrømningsforhold 69
6.1	Opstilling af beregningsmodel
6.2	Beregningsgeometri og -net
6.3	Randbetingelser
6.4	Netpunktsanalyse
6.5	Simuleringsresultater
6.6	Dimensionsløse luftstrømningsparametre
Kapitel	7 Sammenligning af luftstrømningsforhold 95
7.1	Luftstrålernes hastigheds- og temperaturudvikling
7.2	Luftstrålernes hastigheds- og temperaturniveau i forhold til komfortkrav 99
7.3	Luftstrålernes kølingspotentiale

Kapitel 8	8 Diskussion	105
Kapitel 9	9 Konklusion	109
Litteratı	ır	111
Bilag A	Komfortkrav til Bolig for livet	
Bilag B	Inputparametre til BSim enkelt-zone modeller	

- Bilag C Teori om luftstrømninger
- Bilag D Tvær- og opdriftsventilation
- Bilag E Ensidet ventilation
- Bilag F Teori om numerisk modellering af luftstrømninger i rum
- Bilag G Netpunktsanalyse bilag
- Bilag H CFD Benchmark 2D test
- Bilag I CFD-simuleringer af lufthastighedsforhold
- Bilag J CFD-simuleringer af lufttemperaturforhold
- Bilag K CFD-simuleringer af komfortniveau
- Bilag L CFD-simuleringer
- **Bilag M Tegninger**

INDLEDNING

I et moderne samfund tilbringer mennesker størstedelen af tiden indendørs enten i boliger eller på arbejdet [Bolius, 2013]. Derfor er det vigtigt for menneskets trivsel og velvære at opretholde et tilfredsstillende fysiologisk og psykologisk indeklima i de bygninger vi opholder os meget i. For at opnå et tilfredsstillende indeklima er det vigtigt at designeren tager hensyn til forskellige indeklimafaktorer og analyserer deres indbyrdes sammenhæng. Figur 1.1 viser en oversigt over de fysiske faktorer ved indeklimaet som har betydning for designeren ved dimensionering af indeklimaer i bygninger. Samtidig understreger den de forskellige indeklimafaktorers kompleksitet i forhold til beboerens trivsel og velvære. [Hyldgård et al., 1997]



Figur 1.1: Indeklimaets fysiologiske og psykologiske faktorer [Hyldgård et al., 1997].

Det termiske indeklima omfatter beboerens aktivitetsniveau og varmebeklædningsisolans, rummets middelstrålingstemperatur, den relative luftfugtighed og ikke mindst rumluftens temperatur [Hyldgård et al., 1997]. Kombinationen af faktorerne har stor indvirken på menneskets varmebalance. Derfor er det rigtige lufttemperatur- og lufthastighedsniveau i boliger meget afgørende for beboerens mulighed for at befinde sig i termisk komfort. Udenfor det termiske komfortområde kan beboeren ved f.eks. høje indetemperatur risikere at opleve døsighed, hovedpine og nedsat koncentrationsevne og ved for lave indetemperaturer eller ved træk opleve små muskelspændinger og nedsat arbejdsevne. Eftersom det menneskelige legeme er meget sensitivt over for høje og lave rumtemperaturer, eller træk forårsaget af lave temperaturniveauer og høje hastighedsniveauer i luftstrømningerne i rummet, er det meget vigtigt at der tages højde for dette aspekt i designet af hensigtmæssige ventilationsstrategier [Indeklimaportalen.dk, 2013].

1.1 Problemanalyse

Problemanalysen udarbejdes med henblik på opstilling af problemformuleringen, som ønskes besvaret i projektet. I projektet fokuseres primært på luftstrømningers hastigheds- og temperaturniveau i boligers opholdsrum, hvorfor problemanalysen vil tage udgangspunkt i denne problemstilling.

I nutidens lavenergiboliger kan der opstå kølebehov stortset hele året. Dette skyldes blandt andet en velisoleret klimaskærm og store glaspartier mod syd, som bevirker at varmen fra solindstrålingen optages i bygningskonstruktionen for dernæst at afgives meget langsomt igen. Køling af nutidens lavenergiboliger er derfor et vigtig element for at opretholde et acceptabelt indeklima for boligens beboere. Der kan eksempelvis køles via ventilation i form af mekanisk ventilation, naturlig ventilation eller hybrid ventilation, som anvender de positive elementer og reducerer de negative elementer ved mekanisk og naturlig ventilation. Naturlig ventilation er en passiv og energieffektiv metode til køling af lavenergiboliger og dermed nedbringelse af temperaturniveauet. Ved at udnytte luftstrømningsforholdene i boliger via naturlig ventilation er det muligt at køle boligens konstruktion og inventar, som herefter køler rumluften i boligen. Derudover kan automatisk styring af vinduesudluftning, som også inkluderer manuel brugeroverstyring, medfører en højere brugerinteraktion i forhold til mekanisk ventilation, hvilket opfattes som et positivt element for boligens beboere. Et negativt element ved anvendelse af naturlig ventilation i bygninger er dets afhængighed af udeklima- og vejrforhold. Dette bevirker at naturlig ventilation normalt kun anvendes i sommermånederne eller på bestemte tidspunkter i overgangsperioderne. Eftersom naturlig ventilation både indeholder positive og negative elementer er det vigtigt at skabe den rigtige synergi mellem luftstrømningernes egenskaber gennem vinduesåbninger, strømningsforhold i bygningens rum og det ønskede indeklima.

Luftstrømningsforholdene i boligers opholdsrum, skabt ved vinduesudluftning, har stor betydning på beboernes oplevelse af det termiske indeklima. Blandt de faktorer som påvirker menneskets oplevelse af indeklimaet ved forskellige luftstrømningsforhold kan nævnes luftstrålernes type, temperatur, middelhastighed, turbulensintensitet, strømningsretning, hastighedsfluktuationernes frekvens osv. [Nielsen et al., 2013]. Kombinationen af de forskellige luftstrømningsfaktorer har enten en positiv eller negativ indvirken på beboernes opfattelse af indeklimaet afhængigt af om de befinder sig i termisk komfort. Ud fra et designmæssigt synspunkt er det derfor vigtigt at indeklimaet kan ændres ved anvendelse af aktive eller passive klimatekniske anlæg, eller beboerne selv har mulighed for at tilpasse sig til det aktuelle indeklima for at opnå termisk komfort.

Nutidens indeklimaanalyser til evaluering af blandt andet komfort-, luftkvalitets- og dagslysniveauer i bygninger beror på opstilling af modeller. Her anvendes ofte single-zone og multizone modeller, som gør brug af analytiske betragtninger til bestemmelse af zonernes varme, forurenings- og massebalancer. En anden metode til evaluering af indeklimaet er brugen af CFDmodeller (Computional Fluid Dynamics), som har vundet mere indpas i designprocessen, i takt med computerkraftens udvikling. CFD-modellerne tilbyder et stærkt dimensioneringsværktøj til simulering af luftstrømningsforhold, lufthastigheder og lufttemperaturer i bygningsrum. Dette giver designeren mulighed for at evaluere indeklimaet på en helt ny måde og samtidig kvantificere forskellige luftstrømningsforhold som vil have stor betydning for beboerens oplevelse af bygningens indeklima. [Nielsen et al., 2007]

Ud fra metoderne i problemanalysen ønskes det undersøgt, hvordan og under hvilke omstændig-

heder, naturlig ventilation via vinduesudluftning kan reducere det oplevede temperaturniveau og øge lokale lufthastigheder i en lavenergibygnings opholdsrum, så beboerne befinder sig i termisk komfort.

1.2 Problemafgrænsning

Projektets begrænsninger er listet i følgende punkter:

- Bolig for livets køkken-alrum vælges som eneste rum til analysen af analytiske luftstrømningsligninger og CFD-beregning af luftstrømningsforhold, fordi det er et centralt opholdsrum og et kritisk rum med stort lysindfald grundet store vinduespartier som kan resultere i overophedning.
- Luftkvaliteten i køkken-alrummet bliver kun vurderet i Fase 0 Bolig for livet.
- Ved beregning af luftstrømninger ved naturlig ventilation ses der bort fra vinduesåbninger i Z1_Stuen i stueetagen og Z9_Værelse-øst på 1. sal

1.3 Problemformulering

Projektet tager udgangspunkt i boligkonceptet, Bolig for livet, opført i 2008 af VELFAC i samarbejde med VELUX. Bolig for livet er et aktivt hus hvor et lavt energiforbrug, højt indeklimaniveau og lave miljøpåvirkninger er i højsædet. Køkken-alrummet i Bolig for livet, som er et centralt opholdsrum i boligen, danner ramme om analysen af luftstrømningernes betydning for temperaturniveauet og lokale lufthastigheder i opholdszonen.

Analysen, af luftstrømningernes egenskaber for at køle køkken-alrummets konstruktion og dermed rumluften, tager udgangspunkt i forskellige scenarier som ønskes undersøgt i forhold til varierende vejrforhold og vinduesstyringer. Dette analyseres ved et samspil af håndberegninger af analytiske strømningsligninger og numerisk modellering i det kommercielle CFD-program FloVENT. Fokus vil være på luftstrømninger i køkken-alrummet ved naturlig ventilation gennem vinduesåbninger i boligens sydvendte facade og tagkonstruktion og lokal termisk komfort for beboerne. Dette ønskes belyst ved anvendelse af analytiske strømningsligninger sammenlignet med CFD-simuleringer af luftstrømninger i køkken-alrummet ved naturlig ventilation gennem vinduesåbninger i boligens sydvendte facade og tagkonstruktion og lokal termisk komfort for beboerne. Dette ønskes belyst ved anvendelse af analytiske strømningsligninger sammenlignet med CFD-simuleringer af luftstrømningsforhold. I rapportens ønskes det at belyse og undersøge følgende problemstillinger:

- Hvordan og under hvilke omstændigheder kan luftstrømninger, ved naturlig ventilation gennem vinduesåbninger i køkken-alrummets facade og tag, reducere lufttemperaturniveauet og øge lufthastighedsniveauet i boligens opholdszone, så beboerne ikke udsættes for termisk diskomfort?
- Hvordan påvirkes strømnings-, temperatur- og lufthastighedsforhold i rummet ved ændring af styringen, placeringen og størrelsen af vinduesåbningerne?
- Hvilken korrelation er der mellem analytiske strømningsligninger og numerisk modellering af luftstrømningsforhold i et naturligt ventileret opholdsrum.

BOLIG FOR LIVET

Dette kapitel omhandler en beskrivelse af projektbygningen Bolig for livet (BFL). Først beskrives BFL og konceptstrategien bag et aktivt hus. Ud fra et designmæssigt perspektiv redegøres for styringsstrategierne til bygningens tekniske installationer. Slutteligt evalueres BFL's udeklima og indeklimaet i køkken-alrummet ud fra målinger samt vejrforholdene på bygningslokaliteten. Evalueringen af indeklima- og udeklimamålingerne anvendes i kalibreringen af en dynamisk bygningssimuleringsmodel, som i kapitel 5 på side 51 anvendes til analysen af analytiske luftstrømningsligninger, og i kapitel 6 på side 69 anvendes til bestemmelse af randbetingelser for CFD-modellerne af luftstrømningsforholdene i køkken-alrummet.

2.1 Bolig for livet

BFL er et aktivt hus som stod færdigt i år 2009. Huset er en del af konceptet Model Home 2020 lanceret af VELUX gruppen og VELFAC i 2008 i samarbejde med AART arkitekter og Esbensen Rådgivende Ingeniører. Konceptet går ud på at udvikle og teste seks forskellige aktivhuse i fem lande som er henholdsvis Tyskland, Østrig, Storbritannien, Frankrig og Danmark. BFL er opført i Lystrup nord for Århus, og viser det er muligt at skabe en bolig hvor elementer som energi, indeklima og miljø er i højsædet. BFL er designet og opført efter aktivhuskonceptet hvormed det er selvproducerende af energi, udnytter intelligent styring af tekniske installationer og tilstræber et lavt energiforbrug og et godt indeklima hvor mennesket er i centrum. Figur 2.1 og nedenstående principper beskriver aktivhuskonceptet. [VELUX Danmark, 2014]



Figur 2.1: Principperne bag aktivhuskonceptet [Active House Alliance, 2014].

- Energi: Der ønskes CO₂-neutralitet enten ved bygningsintegreret energiproduktion eller/og tilslutning til bæredygtig kollektiv energiforsyning.
- **Indeklima:** Der tilstræbes optimal udnyttelse af naturlig ventilation, optimeret dagslysudnyttelse, akustisk komfort og en høj prioritering af sundheden for beboerne.

• Miljø: Der ønskes miljørigtig håndtering af drikke- og spildevand og anvendelse af bæredygtige materialer.

Figur 2.2 viser BFL fra sydøst. Her ses den sydøstlige facade og tagkonstruktion med tekniske installationer såsom solcelleanlæg til CO₂-neutral elproduktion og et solvarmeanlæg som i kombination med en jordvarmepumpe leverer energi til varmt brugsvand og rumopvarmning. Derudover viser figuren de fire store tagvinduer og fem små facadevinduer under tagets udhæng som anvendes til naturlig ventilation.



Figur 2.2: Sydfacaden af Bolig fra livet. [VELUX Danmark, 2014]

BFL er et énfamilies aktivit hus på 190 m² i 1,5 plan. I bilag M på side 193 viser figur M.1 på side 193 og figur M.2 på side 194 plantegninger af boligens stue plan og 1. sals plan. Boligens stueplan består af henholdsvis et køkken-alrum i åben forbindelse med stuen, et badeværelse og et bryggers. Boligens 1. sal består af to soveværelser, et gæsteværelse og et badeværelse som forbindes af en balkon med udsigt over køkken-alrummet.

2.2 Styringsstrategier for tekniske installationer

BFL er opført med både automatisk og manuel intelligent styring af tekniske installationer. Formålet med boligens intelligente styring er reducering af boligens energiforbrug ved samtidig at opretholde et tilfredsstillende komfortniveau ved blandt andet anvendelse af vinduerne til naturlig ventilation.

Figur 2.3 på modstående side viser energikonceptet for BFL. Boligen anvender energiproducerende og omformenende systemer i form af solceller til produktion af elektriciet, kombineret solfangere og jordvarmepumpe til produktion af varmt brugsvand og energi til rumopvarmning. Derudover er der installeret mekanisk ventilationsanlæg samt styringsenheder til solafskærmning og tagvinduer.

BFL er designet med et vinduesareal som udgør over 40% af hver facade for at sikre optimal

udnyttelse af dagslyset og naturlige ventilation. Derfor har alle rum i boligen også vinduer i minimum to retninger, som har invendig og udvendig solafskærmning der aktivieres for at undgå høje lufttemperatuer i opholdsrummene og nedbringe varmetabet om natten. For yderligere at undgå overophedning har bygningen fast tagudhæng og sideudhæng på rummene der har facader orienteret mod syd. [Foldbjerg et al., 2011]



Figur 2.3: Energi-, dagslys- og ventilationskoncept i Bolig for livet [VELUX Danmark, 2014].

BFL har installeret et hybridt ventilationssystem bestående af et mekanisk ventilationanlæg som leverer frisk luft i vintermånederne og naturlig ventilation ved vinduesudluftning i sommermånederne. Den mekaniske ventilation er installeret med varmegenvinding, så varmen fra udsugningsluften genbruges. Derudover er den behovsstyret, så ventilationsmængderne ændres af sensorer der registrerer lufttemperaturniveauet og fugtniveauet i boligens opholdsrum. Aktivering af den mekanisk ventilation er ved en udetemperaturer under 12,5°C og en relativ luftfugtighed er 60 %. [Foldbjerg et al., 2011]

I sommermånederne anvendes naturlig ventilation, hvor strategisk udvalgte vinduesåbninger i boligen styrer ventilationsmængderne ved enten ensidet-, tvær- og opdriftsventilation eller en kombination. Ligesom styringen ved den mekaniske ventilation er den naturlige ventilation sat til at styre efter lufttemperaturen, men også CO₂-niveauet i boligens opholdsrum. Setpunkter for aktivering af den naturlige ventilation er ved en indetemperatur på 22-23°C og en udendørstemperatur over 12,5°C ved automatisk styret naturlig ventilation. Derudover indeholder styringsstrategien for naturlig ventilation også en mulighed for brugeroverstyring i situationer hvor lufttemperaturniveauet overstiger 25°C og CO₂-niveauet overstiger 1200 ppm. [Foldbjerg et al., 2011]

2.3 Udeklima

Udeklimaet har afgørende betydning for, hvordan drivkræfterne mest optimalt kan udnyttes ved naturlig ventilation. Derfor evalueres udvalgte udeklimaparametre såsom vindhastighed,

vindretning og udelufttemperaturniveauet for målinger på BFL's lokalitet, hvilket er i Lystrup nord for Århus. De målte vejrdata sammenlignes med Danish Design Reference Year (DRY) vejrdata, som er en sammensætning af vejrdata for 12 typiske måneder fra perioden 1975-1989 [DTU, 2011]. Dette gøres for bedre at kunne evaluere de målte vejrdata.

2.3.1 Vind

Drivktrykket ved vind er bestemt af vindens hastighed og retning og BFL's placering af vinduesåbninger. Hertil anvendes vindroser, som giver information om vindretning og vindhastighed ved en bestemt bygningslokation. Derudover viser vindrosen vindens frekvens, så det er muligt at se, hvor ofte en given vindhastighed og -retning er til stede i løbet af året. Figur 2.4 viser vindhastigheder, vindretninger og vindens frekvens for henholdsvis DRY vejrdata og målinger. Det ses at de dominerende vindretninger for både DRY vejrdata og målt vejrdata er syd og sydvest. Vinduerne i køkken-alrummet i BFL til naturlig ventilation er orienteret direkte mod syd og vindroserne viser, at der er færre tidspunkter med høj vindhastighed fra syd sammenlignet med vest og sydvest. Dette kan påvirke muligheden for at opnå et stort vindtryk i køkken-alrummet.



Figur 2.4: Vindroser med alle årets timer fra DRY vejrdata og målt vejrdata.

Figur 2.5 på modstående side viser gennemsnitlig vindhastighed på månedsbasis for målt vejrdata og DRY vejrdata. Derudover ses spredningen af vindhastigheder på månedsbasis ved en 5% fraktil for nedre niveau 95% fraktil for øvre niveau. Figuren viser, at den gennemsnitlige vindhastighed og spredningsintervallet på månedbasis er lavere i målt vejrdata end i DRY vejrdata. Kun februar afviger fra denne tendens med en gennemsnitlig vindhastighed i målt vejrdata som er større end den gennemsnitlige vindhastighed i DRY vejrdata. De gennemsnitlige vindhastigheder i målt vejrdata og DRY vejrdata har en lille variation fra måned til måned. I DRY vejrdata er de gennemsnitlige vindhastigheder i intervallet 3,5-5 m/s og i målt vejrdata er vindhastighederne i intervallet 3-5,5 m/s.



Figur 2.5: Gennemsnitlig vindhastighed på månedsbasis for målt vejrdata og DRY vejrdata med 5% fraktil og 95% fraktil.

2.3.2 Lufttemperatur

Den gennemsnitlig udetemperatur på månedsbasis for målt vejrdata og DRY vejrdata er vist på figur 2.6. Den månedlige gennemsnitlige udetemperatur er modsat vindhastighederne generelt højest for målt vejrdata. I månederne marts-april, september og november-december har temperaturen været markant højere i måleperioden i forhold til DRY. Derudover er den gennemsnitlige udetemperatur på månedbasis meget forskellig fra måned til måned sammenlignet med vindhastighedsniveauerne i figur 2.5. Gennemsnitstemperaturen er højest i juli og august og lavest i januar og februar.



Figur 2.6: Gennemsnitlig lufttemperatur på månedsbasis for målt vejrdata og DRY vejrdata med 5% fraktil og 95% fraktil.

Sammenligning af figur 2.5 og figur 2.6 viser at der er lille variation i vindhastighederne fra måned til måned, hvorimod der er stor variation i udetemperaturniveauet fra måned til måned. Dette faktum stiller selvfølgelig krav til den optimale udnyttelse af drivkræfterne ved naturlig

ventilation, da vinden som drivkræft varierer stokastisk hele året, hvorimod drivkræfterne ved termisk opdrift er størst om vinteren og mindst om sommer grundet temperaturdifferensen mellem inde og ude. Derudover viser en sammenligning af de to figurer, at DRY vejrdata har et generelt højere vindhastigheds- og udetemperaturniveau sammenlignet med målt vejrdata, hvilket indikerer at de målte vejrdata er foretaget i et relativt mildt år.

2.4 Evaluering af målt indeklima i køkken-alrummet

Det målte indeklima i køkken-alrummet evalueres på baggrund af lufttemperaturniveauet og CO_2 niveauet. Formålet med evalueringen er at opnå et sammenligningsgrundlag til kalibreringen af en termisk simuleringsmodel, som anvendes til udvælgelse af typiske situationer med kølebehov i køkken-alrummet. Figur 2.7 viser køkken-alrummet indefra.



Figur 2.7: Køkken-alrummet i BFL [VELUX Danmark, 2014].

Der er foretaget indeklimamålinger af [Esbensen Rådgivende Ingeniører A/S, 2012] i BFL i perioden 1. november 2010 til 31. oktober 2011, hvormed ét års måledata anvendes i evalueringen af indeklimaet. I dette tidsrum boede en familie bestående af to voksne og to børn i boligen, som havde mulighed for brugeroverstyring af f.eks. den naturlige ventilation ved vinduesudluftning, hvormed dette også afspejles i målingerne. Der blev gennemført indeklimamålinger på timebasis af lufttemperaturen, CO₂-niveauet og den relative luftfugtighed i alle bygningens 9 zoner. Zonerne kan ses på plantegning af stue- og første etage, som er vist på figur M.1 på side 193 og M.2 på side 194. Det er valgt at evaluere indeklimaet ud fra det målte og simulerede lufttemperaturog CO₂-niveau i køkken-alrummet i BFL, og dermed udelade den relative luftfugtighed, da den vurderes at have mindre betydning for beboernes komfortniveau [Hyldgård et al., 1997].

Det ville være ønskeligt at dimensionere indeklimaet i køkken-alrummet, så alle beboerne ville være i termisk komfort, men dette må forventes at medføre relativt høje etablerings- og driftsomkostninger, hvorfor indeklimaet i praksis dimensioneres efter et forventet antal utilfredse. Bygningen er designet ved et forventningsniveau, som opfylder Indeklimakategori II, hvilket betegner et normalt forventningsniveau og anvendes til nye bygninger og bygningsrenovationer. Der accepteres en overskridelse på 5% [Esbensen Rådgivende Ingeniører A/S, 2012]. Designkriteriet ved Indeklimakategori II forudsætter krav til rummets lufttemperaturniveau, lufthastighedsniveau og CO_2 -niveau. Komfortkravene for BFL er angivet i bilag A på side 115.

Det termiske indeklima i køkken-alrummet evalueres ud fra kravene til adaptiv komfort [DS/EN 15251, 2007], da BFL er naturlig ventileret. Kriterierne for, at kunne gøre dette er, at beboerne har et normalt aktivitetsniveau, god mulighed for individuelt at tilpasse sig det aktuelle indeklima ved at ændre beklædningsniveau samt mulighed for manuel overstyring af tekniske installationer [DS/EN 15251, 2007]. Ved adaptiv komfort anvendes *Running Mean* metoden, som er beskrevet i bilag A på side 115.

2.4.1 Resultater af målt termisk og atmosfærisk indeklima

Det målte lufttemperaturniveau og CO₂-niveau i køkken-alrummet evalueres. Lufttemperaturniveauet evalueres ud fra adaptiv komfort ved *Running mean* metoden og CO₂-niveauet evalueres i forhold til kategorierne angivet i [DS/EN 15251, 2007]. Beskrivelse af disse metoder kan ses i bilag A på side 115. Ved at evaluere lufttemperaturniveau ud fra adaptiv komfort kræves der en omregning fra målt udetemperatur til *Running mean*, hvilket kan ses i figur 2.8. Det ses, at *Running mean* temperaturen ikke fluktuerer i samme grad som den målte udtemperatur, hvilket både skyldes, at der benyttes middelværdier på dagsbasis og at der i beregning af *Running mean* tages hensyn til temperaturniveauet i de foregående dage.



Figur 2.8: Målt og Running mean udetemperatur.

Anvendelse af *Running mean* metoden til evaluering af målt lufttemperatur indebærer, at grænserne for diskomfort ændres, når *Running mean* udendørstemperaturen når et bestemt niveau. Det er tidligere beskrevet, at forventningsniveauet til evaluering af BFL er Indeklimakategori II, og derfor vises grænser for denne kategori i figur 2.9 på den følgende side. Grænserne for komfort ændres, når *Running mean* temperaturen, og dermed også udelufttemperaturen, stiger. Dette bevirker, at der i målinger er flest timer med diskomfort i vinterhalvåret.



Figur 2.9: Målt indetemperatur i forhold til Running mean udetemperatur og komfortgrænser.

Figur 2.10 og figur 2.11 på modstående side viser målinger for lufttemperaturniveauet i køkkenalrummet på henholdsvis års- og månedsbasis. Den målte lufttemperatur er opdelt i kategorier efter *Running mean* metoden og komfortgrænserne for hver indeklimakategori er inkluderet. Figurerne viser, at de fleste af årets målte timer ligger indenfor komfortgrænserne til indeklimakategori II. Figur 2.11 på næste side viser, at kun marts måned overskrider komfortgrænserne til indeklimakategori II i mere end 5% af tiden. Derudover viser figur 2.10, at der forekommer tidspunkter med indetemperaturer over 26°C i vinter- og overgangsperioderne, selvom Running Mean udendørstemperaturen er lav. Dette kan skyldes tidspunkter med høj solindstråling gennem vinduespartierne, hvor den naturlige ventilation og vinduernes solafskærmning ikke har været tilstrækkelig. Samtidig viser figuren, at der er målt relativt lave indetemperaturer under 21°C i sommermånederne hvor Running Mean udendørstemperaturen er høj. Dette kan skyldes effekten af den naturlige ventilations styring med natkøling, hvor vinduerne er aktive i løbet af natten for at reducere indetemperaturniveauet, og dermed undgå overophedning den følgende dag.



Figur 2.10: Målt lufttemperaturniveau i køkken-alrummet i forhold til *Running mean* metoden på årssbasis fordelt i indeklimakategorier.



Figur 2.11: Målt lufttemperaturniveau i køkken-alrummet i forhold til *Running mean* metoden på månedsbasis fordelt i indeklimakategorier.

Tabel 2.1 viser en samlet vurdering af det målte lufttemperaturniveau i køkken-alrummet. Indeklimakravet med hensyn til målt lufttemperatur er ikke overholdt, eftersom 92,53% af årets timer er indenfor indeklimakategori II, og 7,47% af årets timer er udenfor indeklimakategori II, hvilket er over den accepteble afvigelse på 5%.

Indeklimakategori	Indenfor kategori		Udenfor kategori			
			Un	der	0	ver
	[h]	[%]	[h]	[%]	[h]	[%]
Ι	6007	68,57	1521	17,36	1232	14,06
II	8106	92,53	55	0,63	599	6,84
III	8495	96,97	4	0,05	261	2,98
IV	8760	100,00	0		0	

Tabel 2.1: Målt temperaturniveau i køkken-alrummet i hver indeklimakategori i forhold til *Running mean* metoden.

Figur 2.12 på den følgende side viser resultaterne af luftkvaliteten i køkken-alrummet udtrykt ved målte CO₂-niveauer. Det ses, at luftkvaliteten er bedst i sommermånederne, hvor den naturlige ventilation anvendes til at forebygge overophedning og luftskifterne er større sammenlignet med vintermånederne, hvor den mekaniske ventilation skal dække friskluftbehovet. Resultaterne viser også, at det målte CO₂-niveau overskrider komfortgrænserne til indeklimakategori II i halvdelen af månederne.



Figur 2.12: Målt CO₂-niveau på månedsbasis fordelt i indeklimakategorier.

Tabel 2.2 angiver målinger af CO_2 -niveauet i indeklimakategorier på årsbasis i køkken-alrummet. Her er indeklimakategori II kun overholdt i 81,40% af årets timer.

Indeklimakategori	Antal timer i hver kateg	
	[h]	[%]
Ι	3031	34,60
II	7131	81,40
III	8687	99,17
IV	8760	100,00

Tabel 2.2: Målt CO₂-niveau i hver indeklimakategori.

ANALYSE AF TERMISK SIMULERINGSMODEL

I dette kapitel opstilles og analyseres kølebehovet i køkken-alrummet ved anvendelse af en termisk simuleringsmodel af køkken-alrummet i BSim. Den termiske simuleringsmodel af køkken-alrummet anvendes til flere formål. Først anvendes simuleringsmodellen til beregning af kølebehovet i køkken-alrummet med og uden brug af naturlig ventilation, som anvendes i kapitel 5 på side 51 i analysen af analytiske luftstrømningsligninger. Endvidere anvendes simuleringsmodellen af køkken-alrummet i BSim i kapitel 6 på side 69 til implementering af randbetingelser til CFD-modellerne.

Først beskrives og analyseres BSim multi-zone modellen af BFL i forhold til en enkelt zone-model af køkken-alrummet i BFL. Dernæst kalibreres BSim enkelt-zone modellen ved at evaluere og variere udvalgte parametre i modellen. Slutteligt evalueres det simulerede indetemperaturniveau, for at sikre en acceptabel korrelation mellem det simulerede og målte indetemperaturniveau i køkken-alrummet.

3.1 Opsætning af termisk simuleringsmodel

I dette afsnit beskrives opsætningsproceduren for den termiske simuleringsmodel, som anvendes til simulering af kølebehovet i køkken-alrummet. I BFL har Esbensen Rådgivende Engeniører foretaget målinger af indetemperaturniveau, CO₂-niveau og relativ luftfugtighed i alle rum samt vejrforhold [Esbensen Rådgivende Ingeniører A/S, 2012]. Målingerne af indetemperaturniveauet og CO₂-niveauet i BFL anvendes i kalibreringen af den termiske simuleringsmodel, hvor målinger af vejrforholdene på BFL's lokalitet implementeres i modellens randbetingelser i form af en vejrfil.

Det ønskes at undersøge, hvordan naturlig ventilation kan anvendes til at sænke temperaturniveauet i køkken-alrummet i BFL. Derfor opstilles og analyseres forskellene i en BSim multi-zone model af hele BFL med en BSim enkelt-zone model af køkken-alrummet, hvor begge modeller kan simulere situationer med og uden brug af naturlig ventilation. For at opnå en acceptabel estimering af kølebehovet i køkken-alrummet ved naturlig ventilation, sammenlignet med målinger, udvælges en af simuleringsmodellerne til en videre kalibreringsproces af udvalgte inputparametre.

De termiske bygningssimuleringer udføres i BSim med NV-modulet til simulering af naturlig ventilation [BSim, 2013]. Simuleringerne er foretaget med målte vejrdata fra samme lokalitet som BFL. Inputparametre til vejrfilen i BSim-simuleringerne kan ses i bilag B på side 121.

3.1.1 Præsentation af multi-zone model

BSim multi-zone modellen er opbygget med 9 termiske zoner og anvender samme geometri, konstruktionselementer og styringsenheder til tekniske installationer som i det virkelige BFL. Figur 3.1 på næste side viser BSim optegningen af multi-zone modellen af BFL.



Figur 3.1: BSim multi-zone model af BFL. De røde streger angiver den termiske zone for køkkenalrummet. [BSim, 2013]

Opsætningen af BSim multi-zone modellen inkluderer inputparametre for udstyr, personer, belysning, opvarmning, infiltration, ventilation, udluftning og solafskærmning. Beskrivelsen af inputparametrene til BSim multi-zone modellen er angivet på bilags-CD. Antagelserne i multi-zone modellen er en kombination af antagelser fra Velux og projektgruppe B119 [Scumpieru and Dobre, 2012]. Simuleringsmodellen er desuden opbygget med en vejrfil af målte udeparametre, såsom udetemperatur, vindretning, vindhastighed, solindstråling m.m. Inputparametrene i vejrfilen er angivet i bilag B på side 121, og data for alle målte udeparametre kan ses på bilags-CD.

3.1.2 Sammenligning mellem multi- og enkelt-zonemodel

Indledningsvis er det undersøgt, hvor detaljeret simuleringsmodellen bør være, for at opnå valide simuleringsresultater af indetemperaturniveauet i køkken-alrummet sammenlignet med målinger. I BSim multi-zone modellen er der implementeret 9 termiske zoner, der tager hensyn til, at temperaturen kan variere og derfor medtager varmestrømmen igennem vægge mellem rummene i modellen. En anden mulighed er at opstille simuleringsmodellen med én termisk zone, og dermed negligere varmestrømmen mellem rummene ved at gøre indvendige konstruktioner adiabatiske. Dette resulterer i en mere simpel model, eftersom der ikke defineres input for andre termiske zoner end den termiske zone af køkken-alrummet.

Figur 3.2 på næste side angiver målinger af indetemperaturniveauet i køkken-alrummet, samt målinger af indetemperaturniveauet i tilstødende rum, som i tilfælde af en temperaturdifferens kan have indflydelse på temperaturforholdene i køkken-alrummet. Figuren viser, at der generelt ikke er stor forskel mellem rummene, dog er der en større temperaturdifferens mellem køkkenalrummet og bryggerset om sommeren. Temperaturen for køkken-alrummet ligger generelt i midten af de målte temperaturer i tilstødende rum med en maksimal temperaturdifferens ±2 K. Køkken-alrummets indervægs- og loftskonstruktion har en varmeisolans på henholdsvis R = 2,66 m² · K/W og R = 7,6 m²K/W, hvilket resulterer i en varmeovergang på i alt 45 W/K, hvis samtlige tilstødende rum er enten varmere eller koldere. Denne situation vil dog aldrig forekomme, som vist på figur 3.2. Derfor vurderes en simplificering af modellen at være acceptabel, hvormed BSim enkelt-zone modellen af køkken-alrummet opstilles som én termisk zone med adiabatiske indervægge.



Figur 3.2: Målinger af indetemperaturniveauet i køkken-alrummet og tilstødende rum.

Figur 3.3 viser simuleringsresultater af indelufttemperaturniveuaet for BSim multi- og enkelt-zone modellen sammenlignet med målinger. Det ses, at de to grafer for simuleringsresultaterne følger hinanden gennem året. Dog giver enkelt-zone modellen højere indetemperatur i perioden uge 12-19 og 42-45.



Figur 3.3: Sammenligning af målt indetemperatur og simuleringsresultater for indetemperatur i enkelt- og multizonemodel.

I dette projekt fokuseres der på, hvordan udluftning kan bruges til at køle konstruktion og indeluft ved for høje indetemperaturer. Derfor er det vigtigst, at simuleringsmodellen angiver valide resultater i situationer med kølebehov i køkken-alrummet. En sammenligning kan ses i figur 3.4 på den følgende side, hvor der er stor afvigelse mellem målinger og resultater for standard simuleringsmodellen. Resultaterne af simuleringsmodellen viser ingen overtimer om vinteren, mens indetemperaturen bliver overvurderet i forårs-, sommer- og efterårsperioderne.

Ved sammenligning mellem enkelt- og multi-zonemodellen er antallet af timer med kølebehov generelt højere i enkelt-zone modellen end i multi-zone modellen. Dette tyder på, at i situationer med høje temperaturer i køkken-alrummet opstår en lille varmestrøm til de tilstødende rum, som dermed sænker temperaturniveauet i køkken-alrummet.



Enkeltzonesimulering Multizonesimulering Målinger

Figur 3.4: Sammenligning af antal timer med kølebehov for målingsresultater og simuleringsresultater for enkelt- og multi-zone modellerne.

På trods af en lille overestimering af indetemperaturniveauet i BSim enkelt-zone modellen anvendes denne simuleringsmodel til videre kalibrering. BSim multi-zone modellen indeholder langt flere inputparametre og dermed langt flere variationsmuligheder i simuleringsresultaterne ved ændring af inputparametrene, sammenlignet med BSim enkelt-zone modellen. Derfor vurderes det at kalibreringsproceduren for BSim enkelt-zone modellen er mere kontrollerbar sammenlignet med BSim multi-zone modellen.

3.1.3 Kalibrering af enkelt-zone model

BSim enkelt-zone modellen kalibreres efter perioder med høje lufttemperaturer i målingerne, for at den kan simulere indetemperaturniveauet tilfredsstillende i situationer med kølebehov. Endeligt kalibreres modellens parametre, så der opnås en acceptabel korrelation mellem målt og simuleret data. Inputparametre til BSim enkelt-zone startmodellen og BSim enkelt-zone slutmodellen i kalibreringsproceduren kan ses i bilag B på side 121.

Kalibreringen foretages, for at undersøge og validere inputparametrene i modellen. Foruden målte vejrparametre, geometrien og materialeparametre er inputparametrene i BSim enkelt-zone modellen følgende:

- Udstyr
- Personer
- Belysning
- Opvarmning
- Udluftning
- Ventilation
- Solafskærmning
- Infiltration

I kalibreringen af BSim-enkelt zone modellen er fokus på implementeringen og ændring af klimatekniske systemer, sådan som de har fungeret i BFL. Dernæst fokuseres på at variere forskellige inputparamtre, så simuleringsmodellen giver valide resultater i forhold til målinger. BSim enkelt-zone modellen valideres ud fra følgende karakteristiske sammenhænge mellem simuleret og målt indetemperaturniveau:

- Antal timer med kølebehov pr. uge for året, se figur 3.4 på modstående side
- Antal timer med kølebehov pr. time af døgnet for året, se figur 3.6 på næste side
- Indetemperaturniveau i uge 10, 13, 18 og 42, se figur 3.29 på side 38
- Indetemperatur fordelt på indeklimakategorier på månedsbasis, se figur 2.11 på side 13
- CO₂-niveau fordelt på indeklimakategorier på månedsbasis, se figur 2.12 på side 14
- Gennemsnitligt CO₂-niveau pr. time af døgnet for året, se figur 3.7 på side 21

Kalibreringsproceduren har størst fokus påsituationer med høje indetemperaturer. Derudover fokuseres på luftkvaliteten udtrykt ved CO₂-niveauet i køkken-alrummet, for at sikre, at den naturlige ventilation i simuleringsmodellen ikke er urealistisk effektiv. Figur 3.29 viser målinger af inde- og udetemperaturniveauet og solstrålingen for uge 10, 13, 18 og 42, som angiver ugerne med flest situationer med kølebehov. Figuren viser en stigning af lufttemperaturen i køkken-alrummet ved stigende udetemperaturniveau og solstråling. Samtidig viser figuren at solstrålingen har den største betydning på lufttemperaturniveauet, angivet på figur 3.29 på side 38 (1) hvor der er to dage uden direkte solstråling. Indetemperaturen er tilfredsstillende i netop disse to dage, selvom udetemperaturniveauet er højere d. 31 og 1. end de andre dage i ugen, men indetemperaturen er ikke tilsvarende højere disse dage. Indetemperaturniveauet afhænger dog af flere ting end solstrålingen og indetemperaturniveauet. Simuleringsmodellens inputparametre for elektrisk udstyr, personbelastning og mekanisk ventilation har også indflydelse på lufttemperaturniveauet.

alrummet om morgenen i time 6-8.



Figur 3.6 angiver fordelingen af timer med kølebehov for hele året fordelt på timebasis. Der opstår flest timer fra time 13-22, hvilket skyldes solindstrålingen og varmeafgivelse fra personer og udstyr, i perioder, hvor enten mekanisk ventilation eller vinduesudluftning har været utilstrækkelig. Samtidig viser figuren at der opstår færrest timer med kølebehov i køkken-



Figur 3.6: Antal timer med kølebehov i forhold til time af døgnet for målt data.

Fordelingen af CO_2 -niveauet på timebasis af døgnet er vist på figur 3.7 på næste side, som viser at det gennemsnitlige CO_2 -niveau er i intervallet 740-840 ppm. I timerne hvor CO_2 -niveauet stiger har CO_2 -niveauet fra mennesker været for høj til at ventilationen har kunnet fjerne den. Det er

generelt i timerne 15-23 og det vil typisk være i disse timer, hvor der er størst personbelastning, samt om morgenen. I timerne 6-8 om morgen har det gennemsnitlige CO_2 -niveau været stabilt, hvilket betyder at ventilationskapaciteten har været tilstrækkelig.



Figur 3.7: Middel CO₂-niveau i timer med kølebehov i forhold til time af døgnet for målt data.

1. kalibrering - ændret brug af systemer

Den første kalibrering af BSim enkelt-zone modellen indbefatter parametervariation af modellens klimatekniske systemer for solafskærmning, udluftning og mekanisk ventilation ud fra målerapport fra [Esbensen Rådgivende Ingeniører A/S, 2012], samt antagelser for modellens tekniske systemer fra [Foldbjerg et al., 2012].

Figur 3.8 viser styringsstrategien for solafskærmningen på køkken-alrummets facadevinduer. Figuren viser at solafskærmningen har gennemsnitligt været aktiv 1 time om morgenen og 1 time om aften i løbet af året. Det er valgt at simplificere variationen af hvilke timer solafskærmningen er aktiv til time 9 og 18, da den højst sandsynligt blev anvendt for at afskærme mod solindstråling og omgivelserne [Esbensen Rådgivende Ingeniører A/S, 2012].



Figur 3.8: Aktivering af solafskærmning for hver time i måleperioden [Foldbjerg et al., 2012].

Figur 3.9 viser aktiveringen af vinduerne hvor styringsstrategien for udluftning inddes i to typer; en styring i timeintervallet 8-24 for uge og en styring i timeintervallet 1-24. Udluftning er defineret som værende aktiv i ugerne 14-40, svarende til 4. april til 9. oktober ud fra figuren, hvoraf uge 23-34 er med vinduesudluftning mulig i time 1-24 og de resterende uger i time 8-24.



Figur 3.9: Aktivering af vinduesudluftning for hver time i måleperioden [Foldbjerg et al., 2012].

Derudover foretages ændringer i opsætningen af den mekaniske ventilation. Den mekaniske ventilation var i enkelt-zone startmodellen angivet som et CAV-anlæg med en konstant volumenstrøm på 0,02 m³/s, men det vides fra målerapporten at bygningen anvender et VAV-anlæg [Esbensen Rådgivende Ingeniører A/S, 2012]. Derfor ændres opsætningen til et VAV-anlæg med en volumenstrøm 0,005 m³/s. Der er foretaget variationer af kapaciteten af det mekaniske VAV-anlæg ved simuleringer med VAV-faktor på 2, 3 og 4. Hermed undersøges konsekvensen af, at det måske ikke har været muligt at opnå den dimensionsgivende luftmængde. Den mekaniske ventilation er aktiv i uger, hvor der ikke er mulighed for naturlig ventilation, dvs. ugerne 1-13 og 41-53.

Resultater for simuleringen med ændringer i styring af naturlig ventilation og solafskærmning er vist i figur 3.10, figur 3.11 og figur 3.12 på modstående side. Figuerne viser at variationer i ventilationsmængden har en ringe betydning. Desuden er der foretaget en variation med ændret udendørs CO₂-niveau. Dette skyldes, at udendørs CO₂-niveauet i målingerne aldrig falder til under 571 ppm. Det vurderes at være urealistisk, da CO₂-niveau i byer med god luftkvalitet er omkring 350 ppm [DS/CEN/CR 1752, 2001], hvorfor der burde optræde CO₂-niveauer omkring denne koncentration i nogle perioder i løbet af måleperioden. Derfor antages det, at CO₂måleren har målt for høje niveauer og den laveste målte værdi på 571 ppm anvendes derfor som baggrundskoncentration i stedet for de 400 ppm, som var angivet startsimuleringsmodellen. Simuleringsresultater med denne baggrundskoncentration er også vist i figur 3.10, 3.11 og 3.12 på næste side.



Figur 3.10: Sammenligning af gennemsnitligt CO₂-niveau opdelt på timebasis i løbet af døgnet.



Figur 3.11: Målte og simulerede værdier for CO₂-niveau i køkken-alrum med angivelse af komfortkategorier.

Det er valgt at gå videre med ændringer fra modellen *1. kal VAV faktor 4 + ændret CO2*, da der kun er en ubetydelig ændring i fordeling af overtimer ved at ændre VAV-faktoren. Ved at ændre baggrundskoncentrationen sikres det, at den mekaniske ventilation styrer i forhold til det rigtige CO_2 -niveau. Det samlede resultat af de to ændringer er angivet i figur 3.12, hvor der også sammenlignes med målinger.



Figur 3.12: Sammenligning af fordeling af timer med kølebehov.

Ved sammenligning af simuleringer og målinger, viser figur 3.12 på foregående side stadig en stor forskel på antallet af timer med kølebehov i køkken-alrummet. Især ugerne 12-14 og 41-45 angiver for høje lufttemperaturer i BSim enkelt-zone modellen, mens uge 15-18 viser for få timer med kølebehov.

2. kalibrering - model for udluftning

I multi-zone modellen er der anvendt en beregningsmodel for køling med vinduesudluftning, som automatisk vælger, hvilken udluftningsstrategi, der kan supplere den nødvendige luftmængde til køkken-alrummet. I styringsstrategien for denne beregningsmodel er der anvendt setpunkter for indetemperaturniveauet på 23°C og for luftkvaliteten på CO₂-niveau på 850 ppm. Målet med opsætningen af BSim enkelt-zone modellen er at kunne simulere det samme indelufttemperaturniveau i køkken-alrummet, som er fremkommet ved målinger. Eftersom formålet ikke er en fuldstændig reduktion af timer med kølebehov ved vinduesudluftning, er det vigtigt, ikke at overvurdere effektiviteten af styringsstrategien for den naturlige ventilation som har været anvendt i BFL. Derfor testes forskellige opsætninger af den naturlige ventilation. BSim angiver flere muligheder til beregning af luftmængder ved naturlig ventilation. BSim anvender både de analytiske ligninger, beskrevet i bilag C på side 129, og supplerer med simplere, empiriske ligninger [BSim, 2013].

Der foretages fire variationer af den valgte model fra 1. kalibrering. De fire simuleringsmodeller anvender forskellige beregningsmodeller for vinduesudluftning som benævnes henholdsvis; 2. *Combined*, der anvender en specifik model til beregning af naturlig ventilation der kombinerer åbninger i to niveauer, og tre variationer af en simpel model til beregning af naturlig ventilation benævnt; 2. *Simpel BAC 0,5, 2. Simpel BAC 2* og 2. *Simpel BAC 4*, som anvender et grundluftskifte (BAC) for den naturlige ventilation på henholdsvis 0,5 h⁻¹, 2 h⁻¹ og 4 h⁻¹.

Figur 3.13 angiver antal timer med kølebehov ved simulering med forskellige beregningsmodeller for vinduesudluftning. Figuren viser ingen betydelig variation mellem de forskellige simuleringsmodeller for køling med udeluften, dog ses der lidt flere timer med kølebehov for simuleringsmodellen 2. *Simpel BAC 0,5*. Dette er også modellen med det mindste gennemsnitlige luftskifte ved naturlig ventilation, hvilket kan ses i tabel 3.1 på modstående side.



Figur 3.13: Sammenligning af fordeling af timer med kølebehov.

Tabel 3.1 viser at det gennemsnitlige luftskifte er størst for de to modeller 2. Automatic og 2. Combined, som bruger analytiske ligninger til bestemmelse af luftmængden ved vinduesudluftning. For de simple modeller stiger det gennemsnitlige og maksimale luftskifte ved at øge grundluftskiftet (BAC). Simuleringerne viser at de to modeller 2. Automatic og 2. Combined giver urealistisk høje maksimale luftskifter, selvom der er defineret et maksimalt luftskifte på 10 h⁻¹ i simuleringsmodellerne. Derfor fortsættes kalibreringsproceduren med modellen 2. Simpel BAC 0,5, da det ikke ønskes at overvurdere effektiviteten af simuleringsmodellens udluftningsstrategi ved naturlig ventilation.

	Mide	lel	Maksimal		
Simuleringsmodel	Luftmængde	Luftskifte	Luftmængde	Luftskifte	
	[m ³ /s]	$[h^{-1}]$	[m ³ /s]	$[h^{-1}]$	
2. Automatic	0,158	4,0	2,200	55,2	
2. Combined	0,158	4,0	1,759	44,1	
2. Simpel BAC 0,5	0,100	2,5	0,193	4,8	
2. Simpel BAC 2	0,115	2,9	0,289	7,2	
2. Simpel BAC 4	0,128	3,2	0,385	9,7	

Tabel 3.1: Middel og maksimale luftmængder ved naturlig ventilation i de fem variationer af model til beregning af luftmængde i simuleringsmodellen.

Figur 3.14 viser en ubetydelig ændring i antallet af timer med kølebehov ved variationer i beregningsmodellen for vinduesudluftning ved naturlig ventilation.



Figur 3.14: Sammenligning af fordeling af timer med kølebehov.

3.1.4 3. kalibrering - personer og udstyr

Varmebelastningen for personer og elektrisk udstyr undersøges i BSim enkelt-zone modellen. Tabel 3.2, viser at udstyr og personer gennemsnitligt afgiver mest varme i timer med kølebehov.

Udstyr	Opvarmning	Belysning	Personer
[W]	[W]	[W]	[W]
584	0	107	257

Tabel 3.2: Gennemsnitligt varmebelastning fra input i simuleringsmodel fra 2. kalibrering.

Der er ikke fundet anledning til at variere hverken styringen af inputparametrene for opvarmning eller belysning, eftersom der ikke afgives varme fra opvarmning i timer med kølebehov, og belysning kun bidrager med gennemsnitligt 107 W. Derfor undersøges varmebelastningen for personer og elektrisk udstyr.

I BSim multi-zone modellen er brugstiden for personer i BFL defineret til time 16-07 for hverdage og 0-24 for weekenden [Scumpieru and Dobre, 2012]. Derfor fordeles personbelastningen på 4 personer mellem rummene i BFL i dette tidsinterval, hvilket kan have ført til en overvurdering af personbelastningen i køkken-alrummet. Tabel 3.3 angiver den oprindelige opsætning for personbelastning i køkken-alrummet.

Periode	Tid	Personer	Udstyr
	Time	[n/h]	[W]
Hverdage	23-5	0	395
	6-7	3	659
	8-15	0	395
	16-22	2	724
Weekend	24-8	0	395
	9-10	3	659
	11-15	0	659
	16-22	2	659



Figur 3.15 angiver sammenligningen mellem målinger og resultater for simuleringsmodellen fra 2. kalibrering. Der er en tydelig påvirkning på indetemperaturniveauet og CO_2 -niveauet fra personer og elektrisk udstyr om morgenen i to timer både på hverdage og i weekend. I de timer stiger både antallet af timer med kølebehov og CO_2 niveauet til højere værdier sammenlignet med målinger. Om eftermiddagen er både temperatur- og CO_2 niveau højere sammenlignet med målingerne.



Figur 3.15: Antal timer med kølebehov og middel CO₂-niveau ved simuleringsmodellen Simpel BAC 0,5.

Variationer i personbelastningen undersøges for dens påvirkning på fordelingen af timer med kølebehov. Variationerne er angivet i tabel 3.4 på modstående side, hvor antallet af personer om morgenen og eftermiddag/aften reduceres. Ligeledes reduceres varmebelastningen fra elektrisk

udstyr. Ved gennemgang af beregning af varmebelastning fra udstyr er der kun fundet anledning
til at undersøge effekten af at reducere varmebelastning fra køleskab, da denne afgiver konstant
300 W. Der laves derfor en simulering hvor denne reduceres til 150 W [ØSTKRAFT Net A/S,
2014].

Model		Hverdag			Weekend					
	Tid	Time	6-7	16-22			9-10	16-22		
3. Morgen	Pers.	[-]	1	2			1	2		
	Tid		6-7	8-15	16-22	23-5	9-23	24-8		
	Udstyr	[W]	659	395	724	395	659	724		
	Tid	Time	7-9	16-17	18-21	22	9-10	16-17	18-21	22
3. Morgen	Pers.	[-]	1	1	2	1	1	1	2	1
+aften	Tid		6-7	8-15	16-22	23-5	9-23	24-8		
	Udstyr	[W]	659	395	724	395	659	395		
	Tid	Time	6-7	16-22			9-10	16-22		
2 Udatur	Pers.	[-]	3	2			3	2		
5. Oustyl	Tid	Time	6-7	8-15	16-22	23-5	9-23	24-8		
	Udstyr	[W]	553	253	573	253	553	253		
	Tid	Time	7-9	16-17	18-21	22	9-10	16-17	18-21	22
2 Samlat	Pers.	[-]	1	1	2	1	1	1	2	1
5. Samlet	Tid	Time	6-7	8-15	16-22	23-5	9-23	24-8		
	Udstyr	[W]	553	253	573	253	553	253		

Tabel 3.4: Varmebelastning for person- og udstyr i multi-zone modellen for køkken-alrum.

Opsætningen af varmebelastning fra elektrisk udstyr og personer ændres for at opnå en mere passende fordeling af timer med kølebehov. Ændringerne har effekt på både antallet af timer med kølebehov og det gennemsnitlige CO₂-niveau, og fordelingens påvirkning på antal timer med kølebehov i løbet af døgnet kan ses på figur 3.16 på næste side. Reduceringen af varmebelastningen fra elektrisk udstyr har stor betydning for antallet af timer med kølebehov, idet både model *3. Udstyr* og *3. Samlet* viser store ændringer i fordelingen af timer, hvor *3. Samlet* viser de største ændringer, da denne kombinerer ændringer fra *3. Morgen+aften* og *3. Udstyr*. I timeintervallet 8-16 er fordelingen mellem målinger og simuleringsmodellen *3. Samlet* meget identisk, mens antallet af timer med kølebehov er lavere for simuleringsmodellen i intervallet 17-7.



Figur 3.16: Sammenligning af fordeling af timer med kølebehov.

For de udvalgte uger til validering af simuleringsmodellen har variationerne betydning for indetemperaturniveauet i uge 13 og 42, som er vist på figur 3.17. Det kan ses at indetemperaturniveauet i modellen *3. Samlet* generelt er tættere på måledata.



Figur 3.18 på næste side angiver fordelingen af timer med kølebehov på ugebasis. Der er et markant fald i antallet af timer med kølebehov i uge 10-16 og 41-45, hvilket er perioderne med flest timer med kølebehov i målingerne.


Figur 3.18: Sammenligning af fordeling af timer med kølebehov.

3.1.5 4. kalibrering - infiltration

I BSim multi-zone modellen er infiltration for køkken-alrummet sat til 0,2 h^{-1} og for alle timer i året. Figur 3.19 viser at indetemperaturen falder hurtigere end i målinger når temperaturen har noget sin maksværdi. Dette kan skyldes transmissionstabet, ventilationstabet og infiltrationstabet i modellen. Eftersom konstruktionselementerne i simuleringsmodellen anvender samme materialeparametre som i det virkelige BFL, som er angivet i opsætningen af konstruktionen i bilag B på side 121, foretages ingen variationer af transmissionstabet i konstruktionen. Derudover har variation i den mekaniske ventilationsmængde, tidligere vist, at dette heller ikke har betydelig indflydelse på indetemperaturniveauet. Derfor undersøges indetemperaturniveauet ved at variere simuleringsmodellens infiltrationsmængde.

Der simuleres en variation med et konstant luftskifte ved infiltration på $0,14 \text{ h}^{-1}$ ud fra en infiltrationsrate på $0,13 \text{ l/s} \cdot \text{m}^2$ opvarmet etageareal, og et etageareal for køkken-alrummet på 143,52 m² [SBi 213, 2011]. Infiltrationsraten på $0,13 \text{ l/s} \cdot \text{m}^2$ er et udtryk for infiltration i brugstiden af en bygning og tager højde for infiltration gennem konstruktionsdele og eks. åbning af døre [SBi 213, 2011]. Figur 3.19 viser at ændringen i infiltration ikke har nogen effekt på, hvor hurtigt indetemperaturen falder efter maksværdien.



Figur 3.19: Sammenligning af indetemperaturniveauer for uge 13 og uge 42.

Ændringen i infiltrationsraten har dog haft en betydning på den generelle fordeling af timer med kølebehov. Idet der er blevet udskiftet en lavere mængde luft er det generelle temperaturniveau

steget og det har skabt en stigning i antallet af timer med kølebehov, hvilket kan ses på figur 3.20. Fordelingen af timer med kølebehov i simuleringsmodellen 4. *Infiltration* $0,14h^{-1}$ stemmer bedre overens med fordelingen af timer med kølebehov i målinger end simuleringsmodellen 4. *Standard*, som er modellen fra 3. kalibrering.



Figur 3.20: Sammenligning af fordeling af timer med kølebehov.

Eftersom det generelle temperaturniveau er steget, er der opstået flere timer med kølebehov i ugerne 10-14 og 41-44.



Figur 3.21: Sammenligning af fordeling af timer med kølebehov.

3.1.6 5. kalibrering - tilpasning af solafskærmning

I de foregående kalibreringer er der indledningsvis lavet justeringer af simuleringsmodel i 1. kalibrering ud fra målerapport [Esbensen Rådgivende Ingeniører A/S, 2012], og i 2-4 kalibreringer er opsætningen af inputparametrene undersøgt i simuleringsmodellen. Eftersom det ønskes at forbedre den opnåede simuleringsmodel fra 4. kalibrering, undersøges variationer i solafskærmningen, som kan medføre tilfredsstillende sammenhæng mellem timer med kølebehov i målinger og BSim enkelt-zone modellen.

I køkken-alrummet er der automatisk styret solafskærmning på facadevinduerne på sydsiden, på et facadevindue på østsiden og på de fire tagvinduer. For at undersøge, hvilke variationer i solafskærmningen som er nødvendige anvendes figur 3.22, som viser netto solvarmetilskuddet gennem køkken alrummets vinduesåbninger fra 4. kalibrering. Figuren viser at solvarmetilskuddet gennem vinduesåbningerne i simuleringsmodellen fra 4. kalibrering er mindst for tagvinduerne i store dele af året, mens det generelt er størst for vinduerne i sydfacaden. Derudover opstår høje gennemsnitlige indetemperaturer i perioder, hvor der er stort solvarmetilskud fra vinduerne i både syd- og østfacaden. I sommerperioden opstår det største solvarmetilskud gennem sydfacadevinduerne, men i denne periode er en høj udetemperatur medvirkende til at indetemperaturen forbliver høj.



Figur 3.22: Sammenligning af fordeling af timer med kølebehov.

Tabel 3.5 angiver styringsstrategien ved setpunkter og tidsangivelse for den automatiske solafskærmning i BSim for de tre vinduesplaceringer. Styringsstrategien for solafskærmningen på syd- og østfacaden i time 9 og 18 blev bestemt i 1. kalibrering.

			Solafskærmning				
Bygningsflade	Tidsinterval		Aktiv	Inaktiv	Faktor		
	Uge	Time	[lux]	[lux]	[-]		
Sydfacade	1-53	9, 18	1	0	0,1		
	1-53	1-24	9.300	2.400	0,18		
Østfaarda	1-53	9, 18	1	0	0,1		
Østracade	23-37	1-24	10.000	2.000	0,1		
Tag	1-53	1-24	30.000	10.000	0,07		

Tabel 3.5: Styringsstrategien for solafskærmningen i 4. kalibreringsmodel.

Eftersom tilpasning af tidsstyring og setpunkter for den automatiske solafskærmning er fundet ved mange iterationer, end det vil være hensigtsmæssigt at vise, er der vist den isolerede effekt af de endelige styringer for hver vinduesplacering. Dette giver tre variationer: 5. Sydfacade, 5. Østfacade og 5. Tag. Desuden er der vist resultater for den endelige simuleringsmodel 5. Endelig.

Figur 3.22 viser høje indetemperaturer ved stort solvarmetilskud fra vinduerne på køkkenalrummets syd- og østfacade. Derfor laves en variation, hvor solafskærmningen på østfacaden optimeres, hvilket kan ses i tabel 3.6 på næste side.

					ing
Bygningsflade	Tidsinterval	l	Aktiv	Inaktiv	Faktor
	Uge	Time	[lux]	[lux]	[-]
Sydfacade	1-53	9, 18	1	0	0,1
	1-53	1-24	9.300	2.400	0,18
Østfacade	1-53	9, 18	1	0	0,1
	12, 14-40, 42-45	1-24	8.000	1.000	0,08
Tag	1-53	1-24	30.000	10.000	0,07

Tabel 3.6: Styringsstrategien for solafskærmningen i simuleringsmodel 5. Østfacade.

Der laves også en variation, *5. Sydfacade*, hvor solafskærmning i perioder med høje temperaturer har lave setpunkter og omvendt. I variationen implementeres en styringsstrategi for januar og december med høje setpunkter for temperaturniveauet, eftersom målingerne viser høje temperaturer i netop denne periode. Styringsstrategien for den automatiske solafskærmning for denne variation er vist i tabel 3.7.

		Solafskærmning			
Bygningsflade	Tidsinterval		Aktiv	Inaktiv	Faktor
	Uge	Time	[lux]	[lux]	[-]
	1-53	9, 18	1	0	0,1
0101-	11-23, 42-45	1-24	8000	2500	0,18
Syuracaue	5-10, 24-41, 46-49	1-24	20000	6000	0,18
	1-4, 50-53	1-24	40000	10000	0,25
Østfagada	1-53	9, 18	1	0	0,1
Ustracade	23-37	1-24	10000	2000	0,1
Tag	1-53	1-24	30.000	10.000	0,07

Tabel 3.7: Styringsstrategien for solafskærmningen i simuleringsmodel 5. Sydfacade.

Variation med solafskærmning for taget, 5. Tag er vist i tabel 3.8. Der er indført samme styringsstrategier ved høj og lav temperaturniveau for 5. Sydfacade.

			Solafskærmning		
Bygningsflade	Tidsinterval		Aktiv	Inaktiv	Faktor
	Uge	Time	[lux]	[lux]	[-]
Sydfacade	1-53	9, 18	1	0	0,1
	1-53	1-24	9.300	2.400	0,18
Østfacade	1-53	9, 18	1	0	0,1
	23-37	1-24	10000	2000	0,1
	11-23, 42-45	1-24	15000	5000	0,07
Tag	5-10, 24-41, 46-49	1-24	30000	6000	0,07

Tabel 3.8: Styringsstrategien for solafskærmningen i simuleringsmodel 5. Tag.

Den sidste variation er den endelige simuleringsmodel med en kombination af ændringerne i solafskærmning for de tre vinduesplaceringer er vist i tabel 3.9 på modstående side.

		Solafskærmning			
Bygningsflade	Tidsinterval		Aktiv	Inaktiv	Faktor
	Uge	Time	[lux]	[lux]	[-]
-	1-53	9, 18	1	0	0,1
Sydfacade	11-23, 42-45	1-24	8000	2500	0,18
	5-10, 24-41, 46-49	1-24	20000	6000	0,18
	1-4, 50-53	1-24	40000	10000	0,25
Østfagada	1-53	9, 18	1	0	0,1
Østracade	12, 14-40, 42-45	1-24	8.000	1.000	0,08
Tag	11-23, 42-45	1-24	15000	5000	0,07
	5-10, 24-41, 46-49	1-24	30000	6000	0,07

Tabel 3.9: Styringsstrategien for solafskærmningen i simuleringsmodel 5. Tag.

Figur 3.23 viser variationen i indetemperaturniveauet for de fire simuleringsmodeller af solafskærmningen. Temperaturniveauet i begge uger er højere for modellerne *5. Sydfacade* og *5. Endelig*, hvilket tyder på at ændringerne i solafskærmning for sydfacaden har haft betydning for indetemperaturen. Figur 3.23 viser at indetemperaturniveauet i køkken-alrummet stiger fra dag til dag grundet varmeakkumulering, og utilstrækkelig køling om natten ved mekanisk ventilation.



Figur 3.24 på næste side viser udviklingen i antal timer med kølebehov for simuleringsmodellerne. Der er stor variation i fordelingen af timer med kølebehov, men det er valgt at anvende simuleringsmodel *5. Slutmodel*, som den optimale kalibreret simuleringsmodel. Resultater for denne simuleringsmodel sammenlignes med målinger i afsnit 3.2 på den følgende side.



Figur 3.24: Sammenligning af fordeling af timer med kølebehov.

3.2 Sammenligning af målt og simuleret indeklima

I dette afsnit sammenlignes simuleringsresultater, for BSim enkelt-zone slutmodellen fra kalibreringsproceduren, med målinger af indetemperaturniveauet og CO₂-niveauet i køkkenalrummet. Resultaterne fra simuleringsmodellen evalueres på samme måde, som i afsnit 2.4 på side 10 ud fra kravene til adaptiv komfort [DS/EN 15251, 2007].

3.2.1 Termisk og atmosfærisk indeklima

Figur 3.25 og figur 3.26 på modstående side angiver det simulerede og målte lufttemperaturniveau i køkken-alrumet i forhold til *Running mean* metoden. Tendensen for det simulerede og målte lufttemperaturniveau er den generelt den samme, at der er timer med høje temperaturer på alle tidspunkter i løbet af året. Det simulerede temperaturniveau viser dog flere timer med høje indetemperaturer, når *Running mean* udetemperaturen er høj.



Figur 3.25: Simuleret lufttemperaturniveau i køkken-alrummet i forhold til *Running mean* metoden på årsbasis fordelt på indeklimakategorier.



Figur 3.26: Målt lufttemperaturniveau i køkken-alrummet i forhold til *Running mean* metoden på årsbasis fordelt i indeklimakategorier.

Indetemperaturniveauet sammenlignes på månedsbasis i figur 3.27 på næste side. De simulerede indetemperaturer er højere end målte i perioden maj-oktober, hvor den største forskel ses i oktober måned.



Figur 3.27: Simuleret og målt indetemperatur i køkken-alrummet fordelt på indeklimakategorier.

En samlet opdeling i kategorier for simuleret og målt indetemperaturniveau kan ses i tabel 3.10. Tabellen viser en stor forskel på det samlede antal af timer i kategori I. Derimod er der bedre sammenhæng mellem simuleret og målt indetemperaturniveau i kategori II og III, hvor variationen er henholdsvis 1,51 procentpoint og 1,10 procentpoint. Alt i alt vurderes det, at det generelle indetemperaturniveau viser en acceptabel korrelation for det simulerede og målte indetemperaturniveau i køkken-alrummet.

Indeklima-	Simuleret		Målinger	
kategori	[h]	[%]	[h]	[%]
Ι	7056	80,55	6007	68,57
II	7973	91,02	8106	92,53
III	8398	95,87	8495	96,97
IV	8760	100,00	8760	100,00

Tabel 3.10: Antal timer med simuleret og målt indetemperaturniveau i køkken-alrum fordelt på indeklimakategorier.

Ligeledes foretages en sammenligning af det simulerede og målte CO_2 -niveau i køkken-alrummet. Figur 3.28 på næste side viser det simulerede og målte CO_2 -niveau fordelt på indeklimakategorier. For simuleringer og målinger ses den samme tendens, hvor der opstår høje CO_2 -niveauer om vinteren og lave CO_2 -niveauer om sommeren, hvilket skyldes effektiv vinduesudluftning i sommerperioden og utilstrækkelig mekanisk ventilation i vinterperioden. Resultaterne viser at der opstår flere timer i kategori 1 ved det simulerede CO_2 -niveau sammenlignet med det målinger af CO_2 -niveauet i køkken-alrummet. Generelt er antallet af timer med et CO_2 -niveau svarende til kategori I større i simuleringsmodellen, hvilket indikerer at personbelastningen har været for lav i simuleringsmodellen.



Figur 3.28: Simuleret og målt CO2-niveau i køkken-alrum med fordelt på indeklimakategorier.

Tabel 3.11 angiver ligeledes den store forskel på antallet af timer i indeklimakategori I for det simulerede og målte CO₂-niveau. Forskellen er dog mindre for indeklimakategori II og III.

Indeklima-	Simuleret		Målinger	
kategori	[h]	[%]	[h]	[%]
Ι	5123	58,48	3031	34,60
II	7747	88,44	7131	81,40
III	8740	99,77	8687	99,17
IV	8760	100,00	8760	100,00

Tabel 3.11: Målt CO₂-niveau fordelt på indeklimakategorier.

3.2.2 Timer med høje temperaturer

Simuleringsmodellens primære formål er at simulere det samme indetemperaturniveau i perioder med høje temperaturer sammenlignet med målinger af indetemperaturen i køkken-alrummet. Derfor vises også sammenligning for timer og perioder med høje indetemperaturer. Ud fra gældende komfortgrænser i *Running mean* metoden er der målt 597 timer med kølebehov i køkken-alrummet, mens tallet for simuleringer er 741 timer. Figur 3.29 på næste side viser de fire uger i løbet af året med flest timer med kølebehov i målinger og simuleringer. I uge 10, 13 og 42 er der god overensstemmelse mellem det målte og simulerede temperaturniveau, mens der i den sidste del af uge 18 er større forskel på simulerede og målte indetemperaturer.



Figur 3.29: Indetemperaturniveauet i de fire uger med størst kølebehov for simulering og målinger i køkken-alrummet.

Figur 3.30 viser antallet af timer med kølebehov fordelt på timebasis. Generelt er der ikke stor afvigelse i antallet af timer. Der er dog flere timer med kølebehov i simuleringerne i timeintervallet 9-16.



Figur 3.30: Antal timer med kølebehov på timebasis i simulering og målinger i køkken-alrummet.

Det gennemsnitlige CO₂-niveau i timer med kølebehov er vist i figur 3.31 på næste side. Niveauet er tæt på konstant over døgnet for målinger, mens det varierer mere i simuleringsmodellen. CO₂-niveauet er højere i simulering i timeintervallet 18-22 og lavere de resterende timer af døgnet.



Figur 3.31: Gennemsnitligt CO₂-niveau i timer med kølebehov på timebasis i simulering og målinger i køkken-alrummet

Sammenligningen af timer med kølebehov for målinger og simuleringsmodellen er vist i figur 3.32. Figuren angiver en acceptabel overensstemmelse mellem det målte og simulerede antal timer med kølebehov i køkken-alrummet. Samtidig ses en stor afvigelse mellem målinger og simulering i flere uger i løbet af året, hvilket dog accepteres, eftersom simuleringsmodellens formål er beregning af antal timer med kølebehov i forhold til målinger.



Figur 3.32: Antal timer med kølebehov på ugebasis i simulering og målinger i køkken-alrummet.

KØLEBEHOVET I KØKKEN-ALRUMMET

Dette kapitel omhandler en analyse af vinduesudluftning i køkken-alrummet i BFL. Først beskrives geometrien af køkken-alrummet, da den danner grundlag for analysen af analytiske strømningsligninger og numeriske beregninger af luftstrømningsforhold. Dernæst undersøges situationer, hvor der opstår et kølebehov i køkken-alrummet. For situationerne med kølebehov i køkken-alrummet beregnes luftmængder, udetemperaturniveauer og drivtryk som har været til stede i de givne situationer med kølebehov.

4.1 Køkken-alrummets geometri

Køkken-alrummet har 9 vinduesåbninger som muliggør forskellige ventilationsstrategier og kombinationer af åbninger. Der er fem vertikale facadevinduer og fire tagvinduer, fremhævet på skitsen, der kan anvendes i analysen af luftstrømninger i rummet, eftersom de kan anvendes til naturlig ventilation [VELUX Danmark, 2014]. De resterende vinduer, som kan ses på figur 4.1 bliver ikke anvendt i analysen, da de ikke kan benyttes til naturlig ventilation.

Køkken-alrummets facade- og tagvinduer er tophængte og automatisk styrede, men indeholder også mulighed for overstyring af brugerne. Figur 4.1 viser en 3D skitse af BFL fra sydøst, hvor placeringen af vinduerne til naturlig ventilation er fremhævet.



Figur 4.1: 3D skitse af Bolig for livet og placering af facade- og tagvinduerne i køkken-alrummet.

Tabel 4.1 på næste side beskriver geometrien af vinduesåbningerne, som anvendes i beregninger af drivtryk og luftstrømninger. I facaden er der to vinduesstørrelser, mens vinduerne i tagkonstruktionen har samme størrelse og geometri.

Vinduestype	Postrivalsa	Bredde	Højde
	DESKIIVEISE	[mm]	[mm]
V1	Tophængt udadgående facadevindue	830	320
V2	Tophængt udadgående facadevindue	1320	320
V3, V4	Tophængt udadgående tagvindue	1060	1100

Tabel 4.1: Vinduestyper og deres indvendige mål.

Figur 4.2 viser geometrien af køkken-alrummet. Her ses placeringen af vinduesåbningerne i facade- og tagkonstruktionen. Derudover danner rummets tagkonstruktion, som har en hældning på 30° , et fast udhæng over terrassen. Figuren viser også definitionen på rummets opholdszone, som afgrænses 600 mm fra ydervæg, 100 mm fra indervæg og i en højde på 1800 mm [DS 474, 1993]. Figuren viser også en simplificering af geometrien af køkken-alrummet. Det skraverede område er i BFL en del af køkken-alrummet, men dette ses bort fra af hensyn til beregningerne i analysen af analytiske strømningsligninger, og i analysen af numerisk modellering af luftstrømningsforhold. Derfor vil der i beregninger og CFD-simuleringer indgå en fast væg i afstanden 4,56 m fra sydfacaden. Med den simplificerede geometri har rummet et gulvareal på 27,4 m² og et volumen på 130,1 m³.



Figur 4.2: Skitse af køkken-alrummet med placering af facade- og tagvinduer samt rummets opholdszone. Køkken-alrummets sydfacade er til venstre på tegningen. Alle mål er i [mm].

Figur 4.3 på næste side viser vinduesåbningernes placering på sydfacaden af køkken-alrummet, som indgår i analysen af analytisk- og numerisk strømningsforhold i køkken-alrummet.



Figur 4.3: Opstalt af sydfacade for køkken-alrum med angivelse af brystningshøjder for vinduer. Alle mål er i [mm].

4.2 Evaluering af kølebehov i køkken-alrummet

I dette afsnit analyseres situationer med kølebehov i køkken-alrummet. Parametrene som indgår i analysen er luftmængden, udetemperaturniveau og naturlige drivkræfter ud fra målt vejrdata. Parametrene evalueres i situationer på timebasis.

Indledningsvis i analysen implementeres styringsstrategien for den naturlige ventilation i BSim efter *Running mean* metoden, som er beskrevet i bilag A på side 115. Dernæst opstilles typiske scenarier for situationer med naturlig ventilation i køkken-alrummet ud fra 25%, 50% og 75%-fraktiler af luftmængder, udetemperatur og naturlige drivkræfter for vind og termisk opdrift.

4.2.1 Luftmængdebehov

Styringsstrategien for vinduesudluftning i BSim kan implementeres efter ét fast setpunkt for indetemperaturen pr. tidsstyring, som for alle simuleringerne er begrænset til timeværdier. Når *Running mean* benyttes til at simulere adaptiv komfort varierer grænsen for, hvornår der opstår kølebehov efter udetemperaturen. Derfor inddeles året i nogle faste setpunkter, som varierer efter *Running mean*, som vist i figur 4.4 på næste side.



Figur 4.4: Opdeling af varierende grænse for running mean i faste setpunkter for styring af naturlig ventilation i BSim.

Grænserne danner grundlaget for simuleringen af indeklimaet i køkken-alrummet. I simuleringen er den naturlige ventilation sat til at være aktiv hele året, dvs. når indetemperaturen overstiger grænserne vist i figur 4.4 udnyttes den naturlige ventilation til at sænke temperaturniveauet. Formålet med simuleringen er at undersøge, hvor stort kølebehov der er i hver enkelt time. Derfor tillader styringsstrategien af den naturlige ventilation at anvende luftskifter op til 25 h^{-1} , uden hensyntagen til drivkræfter og trækrisiko. Simuleringsmodellen inkluderer mekanisk ventilation i vinterperioden og den naturlige ventilation anvendes kun til at sænke andelen af kølebehovet, som den mekaniske ventilation og den automatiske solafskærmning ikke har kunne sænke.

Resultatet af simuleringen viser, at det er nødvendigt at anvende naturlig ventilation i 3066 timer for at overholde temperaturgrænserne, som er vist på figur 4.4. Fordelingen af luftmængder kan ses i figur 4.5 og 4.6 på næste side. I situationer med den højeste luftmængde er det nødvendigt at anvende en luftmængde på 0,675 m³/s, svarende til et luftskifte på 16,9 h⁻¹, mens gennemsnittet er 0,066 m³/s, svarende til et luftskifte på 1,6 h⁻¹.



Figur 4.5: Fordeling af luftmængder i situationer med kølebehov. Situationerne for luftmængderne er summeret i søjler med $\pm 5 \cdot 10^{-3}$ m³/s, dvs. kategorien "5" anvender luftmængder i intervallet $0 \cdot 10 \cdot 10^{-3}$ m³/s.



Figur 4.6 angiver den kumulerede fordeling af luftmængderne med angivelse af 25%, 50% og 75%-fraktiler. Størstedelen af luftmængderne er i intervallet 0-0,2 m³/s, nærmere bestemt ca. 95%.

Figur 4.6: Kumuleret fordeling af luftmængder i situationer med kølebehov. 25%, 50% og 75%-fraktilerne svarer til henholdsvis 23, 48 og $86 \cdot 10^{-3}$ m³/s.

Ud fra timerne med kølebehov er der lavet analyse af drivtryk og udetemperatur i de næste afsnit.

4.2.2 Drivkræfter

Drivkræfterne i situationer med kølebehov analyseres for at bestemme typiske drivtryk. De naturlige drivkræfter består af vindtryk og termisk opdrift og kan udnyttes til naturlig ventilation. Beskrivelse af teorien om drivkræfterne kan ses i bilag C på side 129. I figur 4.7 er åbningsplaceringerne, som benyttes i beregning af drivtryk, vist.



Figur 4.7: Vinduesåbningsplaceringer i BFL. FS = facadevinduer syd, NTS = nederste tagvinduer syd, ØTS = øverste tagvinduer syd, FN = facadevinduer nord og TN = tagvinduer nord.

Der er beregnet drivtryk for de forskellige strømningssituationer, som kan give luftstrøm fra enten facade eller tag på sydsiden ind i køkken-alrummet. Det er valgt at simplificere

Fra		Til	
FS	Facade sydside	NTS	Nederste tagvinduer sydside
FS	Facade sydside	ØTS	Øverste tagvinduer sydside
FS	Facade sydside	FN	Facade nordside
FS	Facade sydside	TN	Tag nordside
NTS	Nederste tagvinduer sydside	FS	Facade sydside
NTS	Nederste tagvinduer sydside	ØTS	Øverste tagvinduer sydside
NTS	Nederste tagvinduer sydside	FN	Facade nordside
NTS	Nederste tagvinduer sydside	TN	Tag nordside
ØTS	Øverste tagvinduer sydside	FS	Facade sydside
ØTS	Øverste tagvinduer sydside	NTS	Nederste tagvinduer sydside
ØTS	Øverste tagvinduer sydside	FN	Facade nordside
ØTS	Øverste tagvinduer sydside	TN	Tag nordside

variationsmulighederne til situationer, hvor der benyttes to åbninger til massebalancen. Dette giver 12 mulige strømningssituationer, som er angivet i tabel 4.2.

Tabel 4.2: Strømningssituationer med to vinduesåbninger i BFL, som giver strømning fra facadeeller tagvinduer på sydsiden ind i køkken-alrummet.

For strømningssituationerne, angivet i tabel 4.2, er der beregnet drivkræfter ud fra ligning C.4 på side 131, hvor bidraget for vindtrykket, indelufttrykket og termisk opdrift indgår i den totale trykforskel for åbningerne. For at lette beregningsgangen antages det at åbningsgeometrien for vinduerne på BFL's sydside er identisk med åbningsgeometrien på vinduerne i nordfacaden i den pågældende luftstrømningssituation. Dermed kan det antages, at neutralplanet placeres midt mellem åbningerne og indelufttrykket kan og beregnes som en middelværdi af vindtrykkene på åbningerne. Til beregning af indelufttrykket anvendes ligning C.3 på side 130.

Vindtrykkoefficienter til beregning af det tilladelige vindtryk er vist i tabel 4.3. Værdierne anvendes ud fra antagelsen om at BFL's grundplan er kvadratisk, hvilket kan ses i bilag M på side 193. Taghældningen på køkken-alrummet er 30° for sydsiden og 50° for nordsiden. Eftersom vindtrykkoefficienterne er angivet for taghældninger i intervallerne 10-30° og taghældninger >30° anvendes >30° for begge tagsider [SBi 202, 2002].

	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
FS	0,7	0,35	-0,5	-0,4	-0,2	-0,4	-0,5	0,35
NTS og ØTS	0,3	-0,4	-0,6	-0,4	-0,5	-0,4	-0,6	-0,4
FN	-0,2	-0,4	-0,5	0,35	0,7	0,35	-0,5	-0,4
TN	-0,5	-0,4	-0,6	-0,4	0,3	-0,4	-0,6	-0,4

Tabel 4.3: Vindtrykkoefficienter for bygningsflader i BFL angivet for vindretninger i forhold til syd. Vindtrykkoefficienterne er gældende for en bygning op til tre etager med kvadratisk grundplan placeret i fritliggende terræn [SBi 202, 2002].

Figur 4.8 på næste side angiver kumuleret fordeling af de beregnede drivtryk. Vinduesåbningsplaceringerne er forkortet som vist i tabel 4.2. Det ses, at kombinationen FS→TN generelt giver det største drivtryk (99% af året). Dette skyldes, at denne kombination anvender den største mulige højdeforskel mellem to åbninger i BFL og at åbningerne er placeret på modstående sider af



BFL. Der er 84situationer i løbet af året, hvor dette ikke er tilfældet, og her er det kombinationen FS $\rightarrow \emptyset$ TS, der giver det største drivtryk (1% af året).

Figur 4.8: Varighedsdiagram for beregnet drivtryk for kombinationsmulighederne af åbninger i køkken-alrummet.

Efter drivtrykket er beregnet for alle kombinationsmuligheder af to åbninger anvendes det største drivtryk for hver situation med kølebehov til videre analyse. Figur 4.9 angiver den procentvise fordeling af det største opnåelige drivtryk for hver situation med kølebehov, svarende til 3066 timer. Beregningerne viser at drivtrykket ofte er i intervallet 0,5-1,5 Pa og 1,5-2,5 Pa, eftersom de to intervaller tilsammen dækker over næsten 50% af fordelingen.



Figur 4.9: Fordeling af størst opnåelige drivtryk i situationer med kølebehov. Situationerne er summeret i søjler med \pm 0,5 Pa, dvs. kategorien "5"dækker over 4,5-5,5 Pa.

Den samme tendens kan ses i den kumulerede fordeling i figur 4.10, hvor der ligeledes er angivet 25%, 50% og 75%-fraktiler for drivtrykket.



Figur 4.10: Kumuleret fordeling af størst opnåelige drivtryk i situationer med kølebehov. 25%, 50% og 75%-fraktilerne svarer til henholdsvis 1,54, 2,67 og 7,27 Pa.

4.2.3 Udetemperatur

Udetemperaturniveauet ønskes undersøgt i situationer med kølebehov. Figur 4.11 angiver fordelingen af udetemperaturer. Middelværdien af udetemperaturerne i situationer med kølebehov er 15,0°C og det kan ses, at situationer med kølebehov opstår ved mange forskellige udetemperaturer.



Figur 4.11: Fordeling af udetemperatur i situationer med kølebehov. Situationerne er summeret i søjler med \pm 0,5 K, dvs. kategorien "5"dækker over 4,5-5,5°C.

Figur 4.12 på modstående side viser den kumulerede fordeling af udetemperaturer ved 25%, 50% og 75%-fraktiler. Niveauet for 25%-fraktilen er ved en udetemperatur på 12,3°C, hvilket bevirker at der også opstår situationer med kølebehov i køkken-alrummet ved lave udetemperaturer.



Figur 4.12: Kumuleret fordeling af størst opnåelige drivtryk i timer med kølebehov. 25%, 50% og 75%-fraktilerne svarer til hhv. 12,3, 15,4 og 18,1°C.

4.2.4 Opdeling af situationer med kølebehov i typiske situationer

I dette afsnit anvendes fraktilerne, som er beregnet i de foregående afsnit, til at opstille typiske situationer med kølebehov. 25%, 50% og 75%-fraktilerne definerer kategorierne *Lav*, *Middel* og $H\phi j$, som udgør forskellige typiske situationer. Indledningsvis er der ud fra fraktilerne fundet frem til, hvilket interval i fordelingerne tilhører angivet ved figur 4.5 på side 44, 4.9 på side 47 og 4.11 på forrige side. Dette er vist i tabel 4.4.

Luftmængdebehov								
Kategori	Fraktil		Min.	Maks.	Andel			
	[%]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[%]			
Lav	25	0,02	0,023	0,03	10,90			
Middel	50	0,04	0,048	0,05	8,50			
Høj	75	0,08	0,086	0,09	4,20			
Drivtryk								
Kategori	Fraktil		Min.	Maks.	Andel			
	[%]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[%]			
Lav	25	1,5	1,5	2,5	23,70			
Middel	50	2,5	2,7	3,5	10,90			
Høj	75	6,5	7,3	7,5	2,30			
		Udetem	peratur					
Kategori	Fı	aktil	Min.	Maks.	Andel			
	[%]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]			
Lav	25	12,3	11,5	12,5	6,50			
Middel	50	15,4	14,5	15,5	9,80			
Høj	75	18,1	17,5	18,5	7,80			

Tabel 4.4: Fraktiler og tilhørende intervaller med anddel af 3066 situationer med kølebehov.

De tre parametrer; luftmængde, drivtryk og udetemperatur er underopdelt i tre kategorier. Dette giver 3^3 kombinationsmuligheder, svarende til 27 kombinationer. For de 27 kombinationer

Luftmængde	Drivtryk	Udetemperatur	Antal
Lav	Lav	Lav	15
Lav	Lav	Middel	15
Middel	Lav	Middel	12
Lav	Middel	Middel	7
Lav	Middel	Lav	6
Høj	Lav	Høj	6
Middel	Lav	Lav	5
Middel	Lav	Høj	4
Middel	Middel	Middel	3
Lav	Lav	Høj	2

er det fundet frem til, hvor mange af de 3066 situationer med kølebehov, der passer på en kombinationsmulighed. I alt er der 82 situationer, som passer til kombinationsmulighederne. Tabel 4.5 angiver de 10 hyppigst forekommende kombinationsmuligheder.

Tabel 4.5: De 10 hyppigste forekommende kombinationer af de tre parametre ud fra situationer med kølebehov.

Tabellen viser at luftmængden og drivtrykket ofte optræder i kategorierne *Lav* og *Middel*, mens det for udetemperatur er næsten ligeligt fordelt mellem de tre kategorier. Ud fra de 10 hyppigste kombinationsmuligheder er der tilfældigt udvalgt et scenarie inden for hver kombination. Dette giver 10 forskellige vinduesudluftningsscenarier som er vist i tabel 4.6.

Scenarie	Tidsp	unkt	Kombination	Luftmængde	Drivtryk	Udetemperatur
	Dato	Time		[m ³ /s]	[Pa]	[°C]
1	29-apr	8	Lav-Lav-Lav	0,022	2,1	11,8
2	13-maj	15	Lav-Lav-Middel	0,023	2,4	14,5
3	01-sep	16	Middel-Lav-Middel	0,048	1,7	15,2
4	01-okt	19	Lav-Middel-Middel	0,025	3,4	14,7
5	24-maj	17	Lav-Middel-Lav	0,028	3,3	11,8
6	02-okt	10	Høj-Lav-Høj	0,083	2,5	18,0
7	16-apr	16	Middel-Lav-Lav	0,046	2,5	11,8
8	30-sep	9	Middel-Lav-Høj	0,043	1,6	17,5
9	18-jun	17	Middel-Middel-Middel	0,047	3,0	14,6
10	06-aug	22	Lav-Lav-Høj	0,027	2,3	17,6

Tabel 4.6: 10 udvalgte vinduesudluftningsscenarier.

De 10 forskellige vinduesudluftningsscenarier anvendes i analysen af analytiske strømningsligninger og i analysen af numerisk modellering af luftstrømningsforhold.

LUFTSTRØMNINGSFORHOLD VED ANALYTISKE STRØMNINGSLIGNINGER

I dette kapitel anvendes forskellige vinduesudluftningsstrategier i kombination med analytiske strømningsligninger, til at analysere lufthastigheds- og temperaturniveauet i luftstrålerne ved indtrædelse i køkken-alrummets opholdszone. Dette gøres, for at undersøge, om temperaturniveauet i køkken-alrummet kan nedbringes ved naturlig ventilation uden at skabe træk i opholdszonen.

Analysen omfatter de 10 vinduesudluftningsscenarier, som er beskrevet i kapitel 4 på side 41. Der opstilles ventilationsstrategier for de 10 scenarier ved hensyntagen til luftfordelingen og trækrisikoen i køkken-alrummet.

Kombinationen af aktive vinduesåbninger er bestemmende for rummets ventilationsprincip ved enten ensidet ventilation, tværventilation, opdriftsventilation eller en kombination. Luftstrålerne i køkken-alrummet vil derfor være afhængige af den anvendte ventilationsstrategi.

5.1 Luftfordelingsprincip

Luftstrømning og luftfordeling i køkken-alrummet ved naturlig ventilation er afhængig af vinduesåbningernes placering og luftstrømningen gennem vinduesåbningerne. Luftfordelingen i køkken-alrummet kan ske efter to overordnede principper; opblanding og fortrængning, som er vist i figur 5.1 på den følgende side. Ved fortrængningsprincippet tilføres udeluften til rummet med lille lufthastighed og lufttemperaturer lavere end rumlufttemperaturen gennem åbninger tæt ved gulvniveau. Hermed vil den friske luft stige op ved personer og varmekilder på grund af den termiske effekt hvorved der opnås en høj ventilationseffektivitet, men også risiko for træk i opholdszonen på grund af store temperaturforskelle. Ved opblandingsprincippet tilføres udeluften med høj lufthastighed fra åbninger placeret over opholdszonen hvorved der sker en opblanding af rumluft og udeluft. Dette giver en lavere ventilationseffektivitet sammenlignet med fortrængningsprincippet, men samtidig minimeres risikoen for træk. [SBi 202, 2002]



Figur 5.1: Luftfordelingsprincip i køkken-alrummet.

I forhold til geometrien af køkken-alrummet kan der både anvendes fortrængnings- og opblandingsprincip. Ved fortrængningsprincippet kan facadevinduerne benyttes, hvis lufthastigheden og udetemperaturen bevirker, at luftstrålen falder ned lige efter den har passeret åbningen og kan ramme gulvet uden for opholdszonen og derefter fordele sig langs gulvet.

Opblandingsprincippet er meget anvendelig i forhold til vinduesudformning og -placering i køkken-alrummet. Facadevinduerne er placeret ved den skrå tagkonstruktion, hvorved coandaeffekten kan udnyttes til at opnå en høj indtrængningslængde og dermed "løfte"luftstrålen op over opholdszonen. Tagvinduerne er placeret relativt langt fra opholdszonen hvormed der kan anvendes højere indblæsningshastigheder uden risiko for træk.

5.2 Ventilationsprincip

Ventilationsprincippet i køkken-alrummet er bestemmende for størrelsen af luftskiftet. Ventilationsprincipperne er afhængige af vinduesåbningernes placering i bygningen og de naturlige drivkræfter. Herved opstår den naturlige ventilation enten ved ensidet ventilation, tværventilation og opdriftsventilation eller en kombination.

5.2.1 Luftstrømning ved ensidet ventilation

Ensidet ventilation i køkken-alrummet opstår når et vindue benyttes til både ind- og udstrømning, vist på figur 5.2 på næste side. De dominerende drivkræfter ved ensidet ventilation vil typisk være termisk opdrift i en vintersituation og fluktuationer i vinden i en sommersituation [Heiselberg, 2013].



Figur 5.2: Princip for ensidet ventilation i i BFL.

Sammenlignet med opdrifts- og tværventilation er ventilationsmængden og indtrængningslængden for ensidet ventilation lavere [Heiselberg, 2013]. Ved anvendelse af ensidet ventilation i BFL's køkken-alrum vil det ikke være muligt at kombinere luftstrømninger med andre rum for at opnå større drivtryk og effektiviteten af denne ventilationsform er lavere end tvær- og opdriftsventilation. Derfor kan ensidet ventilation anvendes i situationer, hvor der kun opstår kølebehov i køkken-alrummet og ikke i de tilstødende rum i BFL.

5.2.2 Tværventilation

Tværventilation opstår ved åbninger i to forskellige facader af BFL, vist på figur 5.3. Den dominerende drivkræft ved tværventilation er vind, hvor luftstrømningen indtræder rummet fra vindsiden og bliver suget ud på læsiden.



Figur 5.3: Princip for tværventilation i BFL.

Ved tværventilation af køkken-alrummet sikres det, at luftstrømmen går på tværs af opholdszonen, hvilket sikrer en større køleeffekt.

5.2.3 Opdriftsventilation

Opdriftsventilation i køkken-alrummet udnytter temperaturdifferenser ved vinduesåbninger i forskellige højdeniveauer, vist på figur 5.4. Herved opstår større og mere stabile ventilationsmængder, sammenlignet med ensidet ventilation, ved små temperaturdifferenser mellem ude- og indeluften [Heiselberg, 2013].



Figur 5.4: Princip for opdriftsventilation i BFL.

Ved opdriftsventilation i køkken-alrummet kombineres de termiske drivkræfter og vindtryk til at skabe den nødvendige trykforskel. Figur 4.8 på side 47 viste, at den største trykforskel kan opnåes ved kombinationerne FS \rightarrow TN og FS \rightarrow ØTS, som anvender princippet for opdriftsventilation. Ved denne strategi kan det dog risikeres at luftstrømmen kun bevæger sig over opholdszonen og dermed ikke reducerer temperaturniveauet tilstrækkeligt i opholdszonen.

5.3 Ventilationsstrategier for vinduesudluftningsscenarierne

Vinduesudluftningsscenarierne inddeles i to ventilationsstrategier ud fra de tre parametre luftmængden, drivtryk og udetemperatur. Scenarierne er opdelt i to ventilationsstrategier; strategi 1 som anvender facadevinduerne til indblæsning, og strategi 2 som anvender enten de nederste eller øverste tagvinduerne til indblæsning. Tabel 5.1 på næste side angiver opdelingen af scenarierne i enten ventilationsstrategi 1 eller 2.

Strategi	Scenarie	Luftmængde	Drivtryk	Udetemperatur
	2	Lav	Lav	Middel
	4	Lav	Middel	Middel
Facadevinduer	5	Lav	Middel	Lav
	6	Høj	Lav	Høj
	10	Lav	Lav	Høj
	1	Lav	Lav	Lav
	3	Middel	Lav	Middel
Tagvinduer	7	Middel	Lav	Lav
	8	Middel	Lav	Høj
	9	Middel	Middel	Middel

Tabel 5.1: Ventilationsstrategier for de 10 vinduesudluftningsscenarier.

Det er forsøgt at opdele scenarierne ud fra hensyn til luftstrålens påvirkning i rummet. Derfor ønskes det at anvende facadevinduerne ved *Lav* luftmængde og *Middel* til *Høj* udetemperatur. Dette ønskes, da facadevinduerne er den åbningsplacering, som er tættest på opholdszonen, og hvor der derfor er størst trækrisiko. Det ønskes at anvende tagvinduerne når luftmængden er *Middel* til *Høj* og udetemperaturen samtidig er *Lav*. Dette skyldes ligeledes hensynet til trækrisiko, da der fra disse vinduer er den længste vej til opholdszonen. Der er dog i tabel 5.1 to scenarier, scenarie 1 og 6, hvor der er indeholdt en værdi fra modstridende kategorier i forhold til ønsket om, hvordan de skal opdeles, og her er det valgt at udetemperaturen er den afgørende parameter.

I de følgende afsnit beskrives strømningssituationer for scenarierne, som er delt op i to ventilationsstrategier. Der er forskel i både luftfordelingsprincippet og indblæsningskarakteristika for tvær- og opdriftsventilation sammenlignet med ensidet ventilation. Derfor udvælges der 10 scenarier for tvær- og opdriftsventilation, og 10 scenarier ved ensidet ventilation. Slutteligt sammenlignes og vurderes, hvilket ventilationsprincip, der er mest egnet i de 10 vinduesudluftningsscenarier, vist ved tabel 5.1. Til beregning af luftstrålerne anvendes strømningsligningerne, som er beskrevet i bilag C.1.4 på side 133.

5.4 Strømningsligninger

I ventilerede rum, hvor der er én dominerende luftstråle eller luftstrålerne i rummet ikke påvirker hinanden, kan luftstrålernes udbredelse i rummet beskrives med strømningsligningerne. Strømningsligningerne kan blandt andet beskrive seperate luftstrømme fra indblæsningsluft og luftstrømme omkring varmekilder.

For normale rumstørrelser kan strømningsligningerne bruges til at designe luftfordelingen i rummet, mens præcisionen svækkes ved større og mere kompliceret geometri [Heiselberg, 1995]. Da køkken-alrummet i BFL indeholder kompliceret geometri i form af vinduesåbninger og skråt loft og evt. luftstrømme fra flere vinduer på samme tid strømningsligningerne kan der være begrænsninger i anvendelsen af disse. Ud fra antagelser om karakteristika ved vinduesgeometrien forsøges det ved strømningsligningerne at beregne lufthastigheds- og temperaturniveau ved indtrængen i opholdszonen så præcist som muligt. CFD-beregning vil senere eftervise præcisionen af beregning med strømningsligningerne.

Til beregningen af hastighedsudviklingen for cirkulære fri- og vægstråler anvendes en K_a -værdi på 7 [Heiselberg et al., 2001], og for plane fri- og vægstråler anvendes en K_p -værdi på 3 [Heiselberg, 1995]. I litteraturen er værdierne opgivet som intervaller hvorfra der anvendes en middelværdi, da en mere eksakt værdi ville kræve målinger af de pågældende vinduestyper [Heiselberg, 1995]. Derudover negligeres betydningen af lufstrålernes polafstand x_0 i beregningerne for luftstrålernes hastighedsudvikling, da denne ligeledes ikke kan bestemmes eksakt uden måling for det aktuelle vindue.

Endvidere antages det i beregningen af vægstrålernes indtrængningslængde, at rummets interne varmebelasting fra personer og elektrisk udstyr er jævnt fordelt ved gulvniveau, hvorved der anvendes K_{sa} - og K_{sp} -værdier på 1,5 for henholdsvis en cirkulær og en plan vægstråle [Heiselberg, 1995]. Kontraktionskoefficienten C_d for alle vinduesåbningerne antages at være 0,7 til beregningen af volumenstrømmen gennem vinduesåbningerne, da alle vinduerne har skarpkantede rundinger [Heiselberg, 2013].

5.5 Ventilationsstrategi 1 - facadevinduer

Ved ventilationsstrategi 1 ventileres køkken-alrummet ved anvendelse af facadevinduerne. I det følgende gennemgåes strategien og der vises beregninger for *scenarie 10*. Derefter præsenteres resultater for beregnede strømninger for alle scenarier ved anvendelse af tvær- og opdriftsventilation og ensidet ventilation.

Figur 5.5 viser en principtegning af luftstrømningerne i køkken-alrummet ved ventilationsstrategi 1. Det antages, at luftstrålerne fra facadevinduerne følger den skrå tagkonstruktion, hvorved luftstrålerne tager form som vægstråler. Grundet coanda-effekten klæber luftstrålen til loftet og bliver dermed "løftet"højere op, hvor der samtidig kan opnåes en større indtrængningslængde.



Figur 5.5: Vinduesudluftning ved facadevinduer i køkken-alrummet.

Ved anvendelse af facadevinduerne kan den nødvendige luftmængde sikres ved ensidet ventilation og tvær- eller opdriftsventilation. Ved ensidet ventilation antages det, at stråleformen er fri, da der

vil opstå indstrømning i bunden af vinduet og udstrømning i toppen på grund af densitetsforskelle. Dermed vil indstrømningen være vandret eller nedadrettet.

Ved anvendelse af vinduesåbninger på køkken-alrummets syd- og nordside er det bestemt, at det største drivtryk for de fem scenarier kan opnåes ved at bruge tagvinduerne på nordsiden af BFL til udstrømning, jævnfør afsnit 4.2.2 på side 45. De mulige trykforskelle ved forskellige åbningskombinationer kan ses i bilag D på side 139.

Facadevinduerne er placeret lige under loftet, hvorfor det antages at luftstrålerne udvikler sig til vægstråler. Denne antagelse styrkes af vinduestypen, som er udvendigt tophængt, hvilket giver luftstrålen et opadrettet forløb ind i rummet, da den skal passere vinduet igennem bunden og siderne af selve vinduesåbningen. Luftstrålernes indtrængningslængde kan være op til 1,5 m, hvorefter loftet stopper.

Det antages at luftstrålen fra facadevinduerne vil være cirkulær ved aktivering af to eller færre vinduer ved siden af hinanden. Luftstrålen vil derimod være plan ved aktivering af tre eller flere vinduer ved siden af hinanden.

5.5.1 Beregningseksempel for scenarie 5

I dette afsnit anskueligøres beregningsgangen for luftstrålerne fra facadevinduerne i *scenarie* 5 anvendelse af tvær- og opdriftsventilation. Der er ligeledes foretaget beregning ved ensidet ventilation, som er beskrevet i bilag E på side 141.

Scenarie 5 er en situation fra 24. maj time 17, hvor BSim-simuleringen viser en indetemperatur på $25,59^{\circ}$ C og et luftmængdebehov på $0,028 m^3$ /s. Indetemperaturen overholder grænsen for *Running mean metoden*. De målte udeparametre, som anvendes i beregningen af drivtryk, er vist i tabel 5.2.

Udetemperatur	Vindhastighed	Reference vindhastighed	Vindretning
11,80°C	5,9 m/s	5,7 m/s	85°

Tabel 5.2: Målte udeparametre til beregning af drivtryk for scenarie 5. Vindretning er i forhold til syd positivt med uret.

Reference vindhastigheden, som er vist i tabel 5.2, er beregnet ud fra ligning 5.1 [SBi 202, 2002]. Vindhastigheden omregnes til referencehøjden h = 7,86 m, hvilket er bygningshøjden [Heiselberg, 2006]. Faktoren k vælges til 0,68 og eksponenten α vælges til 0,17, som begge gælder for terrænkategorien *åbent, fladt landskab* [SBi 202, 2002].

$$v_h = v_{10} \cdot k \cdot h^{\alpha} \tag{5.1}$$

Hvor:

v_h	Vindhastigheden i højden h [m/s]
<i>v</i> ₁₀	Meteorologisk vindhastighed i 10 meters højde [m/s]
k	Terræn-afhængig faktor [-]
h	Den aktuelle højde over terræn [m]
α	Terræn-afhængig eksponent [-]
	•

Til beregningen af drivtrykket anvendes åbningskarakteristika, som er vist i tabel 5.3 på den følgende side.

Åbning	Højde	Vindtrykkoefficient
Facadevinduer syd	2,3 m	-0,5
Tagvinduer nord	7,0 m	-0,6

Tabel 5.3: Parametre for åbningerne til beregning af drivtryk for scenarie 5.

Parametrene anvendes i beregningen af trykforskellene ved vind og termisk opdrift, som er givet ved ligning C.4 på side 131. I beregningerne sættes luftens densitet ρ =1,20 kg/m³ og tyngdeacceleration g=9,82 kg/m·s². I beregning af drivtrykket ved termisk opdrift anvendes neutralplanet, som angiver højdeniveauet, hvor udetrykket er lig med indetrykket. I beregningerne anvendes to åbninger med identiske åbningsarealer. Derfor er neutralplanet placeret midt mellem de to åbninger, svarende til H₀ = (H₁+H₂)/2 = (2,3 m+7,0 m)/2 = 4,65 m. Herved bliver den totale trykforskel:

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_w + \Delta P_t = -9,7Pa - (-10,7Pa) + 1,3Pa = 2,3Pa$$
(5.2)

Trykforskellen er positiv, hvilket sikrer indstrømning gennem facadevinduerne. Trykforskellen er ligeledes beregnet for kombinationer med nederste og øverste tagvinduer og facadevinduerne på nordsiden, og kan ses i bilag D på side 139.

Ud fra luftmængden på 0,028m³/s kan det nødvendige effektive åbningsareal beregnes ved ligning C.5 på side 131 til 0,020m². Ved anvendelse af ligning 5.3 beregnes den resulterende hastighed i åbningen til 1,38 m/s [SBi 202, 2002].

$$Q_k = A_k \cdot V_k \Leftrightarrow V_k = \frac{Q_k}{A_k}$$
(5.3)

Hvor:

 Q_k | Volumenstrøm [m³/s]

 A_k Kontraheret tværsnitsareal [m²]

 V_k Lufthastighed [m/s]

Efter beregningen af ude- og indetemperatur, indblæsningshastighed og nødvendigt åbningsareal, til de analytiske strømningsligninger, bestemmes kombinationen af aktive vinduer og tilhørende åbningsgrader, som giver lavest lufthastighed i luftstrålerne ved indtrædelse køkken-alrummets opholdszone. For facadevinduerne muligt at opnå fire forskellige stråletyper: cirkulær væg- og fristråle og plan væg- og fristråle. For hver stråletype er det muligt at kombinere forskellige antal aktive vinduer i facadeåbningen, hvilket er angivet i tabel 5.4.

Antal vinduer	Stråletype					
	Cirkulær fri	Cirkulær væg	Plan fri	Plan væg		
1	\checkmark	\checkmark				
2	\checkmark	\checkmark				
3	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark		
4	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark		
5			\checkmark	\checkmark		

Tabel 5.4: Vindueskombinationer og stråletyper for facadevinduerne i køkken-alrummet.

Hastighedsudvikling for strålerne er beregnet ud fra ligning C.8 på side 134, C.9 på side 134, C.10 på side 135 og C.11 på side 135. For vægstrålerne er der beregnet indtrængningslængder ud fra ligning C.13 på side 136 og C.14 på side 136. For cirkulære fristråler kan luftstrålens bane beregnes ved ligning C.12 på side 135, mens der for plane fristråler ikke er en formel til beregning af dette. Til beregning af temperatur i luftstrålerne anvendes forholdet, som er vist i ligning C.17 på side 137, hvor det antages, at lufttemperaturdifferensen mellem indblæsning og et punkt i centrum af luftstrålen mindskes i samme takt med hastighedsfaldet i luftstrålen.

I beregningerne er det antaget, at ved anvendelse af andre ventilationsprincipper end ensidet ventilation, er stråleformen en vægstråle. Derfor antages det, at strålen klæber til loftet over facadevinduerne indtil den beregnede indtrængningslængde. I den afstand, som svarer til indtrængningslængden skifter luftstrålen fra væg- til fristråle. Derfor er hastigheden ved opholdszonen beregnet ud fra figur 5.6. For plane fristråler er der ikke udviklet en formel, til bestemmelse af luftstrålens bane. Derfor beregnes hastigheden ved opholdszonen ved denne stråleform ud fra den lodrette afstand til opholdszonen, som vist på figur 5.6. For cirkulære fristråler kan luftstrålens bane beregnes, og dermed anvendes den korteste afstand mellem strålens startpunkt og punktet hvor strålen indtræder opholdszonen, til beregning af den maksimale hastighed ved opholdszonen. Dette er vist på figur 5.6.

Ved ensidet ventilation er det antaget, at stråleformen er fri, hvorfor stråleformen anvender den korteste afstand mellem midtpunktet i facadevinduet til punktet, hvor strålen rammer opholdszonen. Ved plane fristråler anvendes den lodrette afstand, som vist på figur 5.6.



Figur 5.6: Afstande, som indgår i beregning af korteste afstande til opholdszonen for plane luftstråler. 1 = x-akse for vægstråle, 2 = eksempel på korteste afstand til opholdszone for plan vægstråle med indtrængningslængde = 1,53 m og 3 = korteste afstand til opholdszone for plane fristråler.[Nielsen et al., 2013]

Ud fra disse antagelser om, hvordan den maksimale hastighed ved opholdszonen kan beregnes, vises beregning for tilfældet med 3 vinduer og stråleformen plan vægstråle. Konstanterne i beregningen kan ses i tabel 5.5 på den følgende side. Arealet A_0 angiver det effektive areal divideret med 3.

T_i	T_u	ΔT	u ₀	A_0	K _p	K _{sa}
25,59°C	11,80°C	13,79 K	1,38 m/s	0,020 m ³	3	1,5

Tabel 5.5: Konstanter til beregning for luftstråle i scenarie 5.

Ud fra ligning C.14 på side 136 beregnes strålens indtrængningslængde til 0,66 m, og hastigheden i denne afstand beregnes til 0,49 m/s. Ud fra antagelsen om, at luftstrålerne klæber til loftet, svarer afstanden 1,13 m på en akse langs loftet til afstanden 0,52 m på en vandret x-akse i vinduesåbningen. Ved x = 0,52 m skifter strålen fra væg- til fristråle. Typen af luftstrålen skifter, for at beregne et realistisk resultat for hastigheden ved opholdszonen og for at kunne beregne, det punkt, hvor luftstrålen rammer opholdszonen.

For at kunne beregne hastighedsudviklingen i fristrålen skal hastigheden i punktet, hvor luftstrålen skifter form, være ens ved beregning for både plan væg- og fristråle. Derfor opstilles en ligevægt givet ved ligning 5.4. Det er valgt, at u_0 , a_0 og K_p for fristrålen er de samme som for vægstrålen. Hastigheden skal være ens i x = 0,66 m for fristrålen og x = 0,52 m for vægstrålen. Derfor indføres en fiktiv x₀, som der itereres en værdi for, så der opnåes ligevægt. Ud fra ligning 5.4 fåes x₀ = -0,05.

$$u_{xfs} = u_{xvs} \Leftrightarrow \frac{K_p}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{h_0}{x_{fs} + x_0}} \cdot u_0 = K_p \cdot \sqrt{\frac{h_0}{x_{vs}}} \cdot u_0$$
(5.4)

Hvor:

Lufthastighed i plan fristråle [m/s] u_{xfs} Lufthastighed i plan vægstråle [m/s] u_{xvs} Indblæsningshastighed i x-retning [m/s] u_0 Konstant for vinduestype [-] K_a Areal af indblæsningsåbning [m²] a_0 Løbende koordinat i x-retning for fristråle [m] x_{fs} Løbende koordinat i x-retning for vægstråle [m] x_{vs} Fiktiv polafstand [m] x_0

Dernæst beregnes luftstrålens hastighedsudvikling. Fristrålen starter i y = 2,70 m og da strålens bane ikke kan beregnes for en plan fristråle anvendes den lodrette afstand til opholdszonen som, er 2,70-1,80 = 0,90 m, i beregningen er lufthastigheden ved opholdszonen. Derfor findes den maksimale hastighed ved opholdszonen ud fra ligning C.10 på side 135 til u(x)=u(0,52+0,90) = 0,17 m/s. Temperaturniveauet i luftstrålen ved intrædelse i opholdszonen beregnes til 23,92°C ved anvendelse af ligning C.17 på side 137.

Den beregnede lufthastighed og -temperatur i luftstrålen sammenlignes med kravet til maksimal hastighed i opholdszonen ved den beregnede temperatur. Ud fra ligning A.2 på side 117 for trækrisiko med turbulensintensitet 40% og PD 20% udregnes den maksimale tilladte lufthastighed til 0,21 m/s ved 23,92°C. Eftersom hastigheden i luftstrålen ved opholdszonen er beregnet til 0,0,17 m/s opstår der, udfra de givne antagelser, ikke risiko for træk.

Tilsvarende beregningsgang er udført for de andre vindues- og luftstrålekombinationer vist i tabel 5.5 på forrige side. Resultaterne kan ses i tabel D.1 på side 139 i bilag D på side 139. For cirkulær og plan fristråle ved ensidet ventilation er ligning C.6 på side 132 anvendt til bestemmelse af åbningsarealet ud fra luftmængden for det enkelte scenarie, hvilket er beskrevet i bilag E på side 141.

5.6 Ventilationsstrategi 2 - tagvinduer

Ved ventilationsstrategi 2 ventileres køkken-alrummet ved anvendelse af enten de nederste eller øverste tagvinduer. Det er en fordel at bruge tagvinduerne til indstrømning når det er muligt, da de har en brystningshøjde på henholdsvis 3,9 m og 4,6 m og dermed stor afstand til opholdszonen, hvilket resulterer i mindre risiko for træk. En principskitse af luftstrømningen kan ses i figur 5.7.



Figur 5.7: Vinduesudluftning ved øverste tagvinduer i køkken-alrummet.

Ved at benytte tagvinduerne er der kortere afstand til den bagerste del af opholdszonen og dermed kan denne del ventileres ved lavere hastigheder end ved facadevinduerne. Ved tagvinduerne kan der ligesom ved facadevinduerne benyttes både tvær-, opdrifts- og ensidet ventilation. Ved tvær- og opdriftsventilation er luftstrømmen ensrettet igennem vinduesåbningerne og dermed har strålen en mere vandret vinkel end ved ensidet ventilation, hvor der opstår udstrømning i toppen af åbningen og indstrømning i bunden. Ved ensidet ventilation vil strålen derfor være mere nedadrettet.

Både de nederste og øverste tagvinduer er placeret med stort mellemrum og vinduerne er næsten kvadratiske, hvormed det antages at luftstrålerne er cirkulære. Luftstrålerne vil være fristråler, da der går en bjælke på tværs af rummet lige over vinduerne, hvorved udviklingen til vægstråle bremses. Desuden bevirker vinduestypen, som er udvendigt tophængt samt hældningen på vinduet, at luftstrømningen vil have et næsten vandret forløb ind i køkken-alrummet.

5.6.1 Beregningseksempel for scenarie 9

I dette afsnit vises beregninger af de nødvendige parametre til at beskrive luftstrømningen fra de øverste tagvinduer i scenarie 9. Fremgangsmåden til beregning af drivtrykket er den samme som vist i afsnit 5.5.1 på side 57, hvorfor der kun vises hvilke værdier, som indgår i beregningen. Beregning af nødvendigt åbningsareal ved ensidet ventilation er vist i bilag E på side 141.

Scenarie 5 er time 17 den 18. juni, hvor BSim-simuleringen viser en indetemperatur på 26,42°C og et luftmængdebehov på 0,047 m^3 /s. Indetemperaturen overholder grænsen for *Running mean* for timen, da udetemperaturen i perioden før har været høj. De målte udeparametre, som er anvendt til beregning af drivtrykket er vist i tabel 5.6.

Udetemperatur	Vindhastighed	Reference vindhastighed	Vindretning
14,6°C	2,10 m/s	2,03 m/s	329°

Tabel 5.6: Målte udeparametre til beregning af drivtryk for scenarie 9. Vindretning er i forhold til syd positivt med uret.

Endvidere er der i drivtryksberegningen anvendt parametre for åbningerne, som er vist i tabel 5.7 ud fra geometrien af BFL. Det kan ses, at der i denne time er samme vindtrykkoefficient på de to åbninger og derfor udligner indelufttrykket og vindtrykket hinanden, da der anvendes identiske åbningsarealer i beregningen.

Åbning	Højde	Vindtrykkoefficient
Øverste tagvinduer syd	4,9 m	-0,4
Tagvinduer nord	7,0 m	-0,4

Tabel 5.7: Parametre for åbningerne til beregning af drivtryk for scenarie 9.

I ligning 5.5 ses de beregnede drivkræfter, som viser, at der kan opnåes 0,5 Pa for åbningskombinationen.

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_w + \Delta P_t = -1,0Pa - (-1,0Pa) + 0,5Pa = 0,5Pa$$
(5.5)

Trykforskellen er ligeledes beregnet for kombinationer med nederste tagvinduer og facadevinduerne på syd- og nordsiden og kan ses i bilag D på side 139. Luftmængden er fundet til 0,047m³/s, og det effektive åbningsareal er bestemt ved ligning C.5 på side 131, til 0,075m². Ved anvendelse af ligning 5.3 på side 58 beregnes den resulterende hastighed i åbningen til 0,63 m/s [SBi 202, 2002].

For de øverste tagvinduer er der to kombinationsmuligheder af vinduer, da der kun er to tagvinduer ved denne åbningsplacering. Dette betyder, at der kan anvendes et eller to vinduer, hvor luftstrålen i begge tilfælde vil antage en cirkulær fristråle, som tidligere beskrevet. For kombinationen med to aktive vinduer er der anvendt følgende parametre som vist i tabel 5.8.

T _i	T _u	ΔT	u ₀	A ₀	Ka	K _{sa}
26,42°C	14,60°C	11,82 K	0,63 m/s	0,075 m ³	7	1,5

Tabel 5.8: Parametre til beregning for luftstrålen i scenarie 9.

Ved anvendelse af ligning C.12 på side 135, som beskriver luftstrålens bane, er det beregnet, at luftstrålen rammer opholdszonen y = 1,80 m, i x = 4,70 m. Ved beregningen af hastigheden i dette punkt anvendes den resulterende afstand mellem indblæsningåbningen i x = 2,79 m og y = 4,88 m og punktet, hvor luftstrålen rammer opholdszonen, hvilket giver en afstand på 3,63 m. Ved at indsætte denne afstand i ligning C.8 på side 134 udregnes den maksimale hastighed ved opholdszonen til 0,17 m/s og temperaturen til 23,30°C.

Lufthastigheden sammenlignes med komfortgrænsen ved denne temperatur, og ved anvendelse af ligning A.2 på side 117 beregnes den maksimale tilladte lufthastighed til 0,20 m/s, så kravet til lufthastigheden overholdes ved denne vinduesstrategi. Tilsvarende beregning er foretaget med et aktivt vindue i stedet for to, hvilket resulterer i en maksimal lufthastighed på 0,23 m/s og lufttemperatur 22,16°C ved opholdszonen. Trækgrænsen ved dette temperaturniveau er 0,18 m/s, hvorfor ventilationsstrategien som kun inkluderer et aktivt vindue ikke overholder komfortkravet.

5.7 Resultater for vinduesudluftningsscenarier

I dette afsnit undersøges, for hvert af de 10 vinduesudluftningsscenarier, hvilken vindueskombination, som medfører de laveste hastigheder i opholdszonen. Resultaterne for samtlige vindueskombinationer for hvert af de 10 scenarier er angivet i bilag D på side 139 og E på side 141. Først præsenteres resultater for tvær- og opdriftsventilation, og dernæst vises resultater for ensidet ventilation. Slutteligt sammenlignes resultaterne for vindueskombinationerne.

5.7.1 Tvær- og opdriftsventilation

Resultaterne for de 10 vinduesudluftningsscenarier ved tvær- og opdriftsventilation overholder kravene til hastigheds- og temperaturniveauet i luftstrålerne ved opholdszonen, ved gældende antagelser for anvendelsen af luftstrømningsligningerne. Tabel 5.9 angiver parametrene som indgår i beregningerne af scenarierne. De beregnede effektive arealer er i intervallet 0,020-0,077 m², og indblæsningshastigheder i intervallet 0,56-1,38 m/s.

Scenarie	Indetemperatur	Eff. areal	Indblæsningshastighed	Stråletype	Antal vinduer
	T_i	A_0	u ₀		
	$[^{\circ}C]$	[m ²]	[m/s]		
1	25,80	0,028	0,79	CF	2
2	25,54	0,038	1,18	PV	4
3	26,60	0,077	0,62	CF	2
4	26,66	0,018	1,37	PV	3
5	25,59	0,020	1,38	PV	3
6	26,59	0,071	1,18	CV	4
7	23,92	0,071	0,65	CF	2
8	26,63	0,077	0,56	CF	2
9	26,42	0,075	0,63	CF	2
10	27,76	0,023	1,17	CV	3

Tabel 5.9: Parametre fra beregning af drivtryk og luftstråler for de 10 scenarier. CV = cirkulær vægstråle, PV = plan vægstråle, CF = cirkulær fristråle.

Tabel 5.10 angiver parametre til beskrivelse af luftstrålerne ved opholdszonen. For lufttemperatur og -hastighed er der vist hastighedskrav u_{maks} ved den beregnede temperatur T_{oz} af luftstrålen og temperaturkrav T_{nedre} ud fra *Running mean* metoden. Tabellen viser, at luftstrålerne overholder kravene til både lufthastigheds- og temperaturniveauet ved indtrædelse i opholdszonen.
Scenarie	Hastighed	Temperatur	Punkt	Hastighedskrav	Temperaturkrav
	\mathbf{u}_{oz}	T_{oz}	(x,y)	u _{maks}	T _{nedre}
	[m/s]	[°C]	[m;m]	[m/s]	[°C]
1	0,16	22,99	(3,33;1,80)	0,19	20,00
2	0,17	23,98	(0,56;1,80)	0,21	20,00
3	0,17	23,56	(4,71;1,80)	0,20	21,00
4	0,15	25,32	(0,55;1,80)	0,23	20,00
5	0,17	23,92	(0,52;1,80)	0,21	20,00
6	0,21	25,07	(3,42;1,80)	0,23	20,00
7	0,16	20,92	(4,71;1,80)	0,17	20,00
8	0,15	24,19	(4,73;1,80)	0,21	20,00
9	0,17	23,30	(4,70;1,80)	0,20	20,00
10	0,18	26,24	(2,60;1,80)	0,25	21,60

Tabel 5.10: Parametre for luftstrålernes indtrædelse i opholdszonen for de 10 scenarier.

Resultaterne af luftstråleberegningerne viser, at der kan anvendes vinduesudluftning for 10 typiske situationer i måleperioden i BFL, uden risiko for træk i opholdszonen. Figur 5.9 på side 67 angiver resultater for luftstrålernes baner i køkken-alrummet og opholdszonen ved de forskellige kombinationer af aktive vinduesåbninger.



Figur 5.8: Resultater af luftstrålernes baner i køkken-alrummet.

Resultaterne for luftstrålernes bane i køkken-alrummet, viser at anvendelsen af tagvinduerne, medfører den bedste opblanding af luften i rummet på grund af lange indtrængningslængder. For

facadevinduerne afhænger opblandingen af rumluften af, hvor lang indtrængningslængde, der kan opnås langs loftet over vinduerne. Hvis luftstrålernes indtrængningslængde ikke er lang nok, vil luftstrålerne falde ned midt i opholdszonen, hvilket kan medføre træk, og ringe ventilering af opholdszonen. Ved plane vægstråler fra facadevinduerne er indtrængningslængderne i intervallet 0,7-1,12 m langs loftet, hvormed der er risiko for, at strålerne indtræder opholdszonen i den første halvdel af rummet, hvilket kan resultere i ringe ventilering af hele opholdszonen.

5.7.2 Ensidet ventilation

Ved ensidet ventilation vises ligeledes resultater for luftstrømningerne med mindst trækrisiko for de 10 scenarier. Tabel E.1 på side 141 angiver vinduesåbningsarealer, for at opnå den ønskede luftmængde til køling af køkken-alrummet. Åbningsarealerne er beregnet ud fra den vertikale åbningshøjde af facade- eller tagvinduerne.

Ved ensidet ventilation er åbningsarealerne større end for tvær- og opdriftsventilation, hvorfor der anvendes så mange vinduer som muligt til at supplere den nødvendige udeluftmængde. Tabel 5.11 på næste side viser, at åbningsarealerne er i intervallet 0,10-0,48 m² og indblæsningshastighederne er i intervallet 0,17-0,27 m/s. Ved ensidet ventilation er alle luftstrømningerne fristråler.

Scenarie	Indetemperatur	Eff. areal	Indblæsningshastighed	Stråletype	Antal vinduer
	T_i	A_{eff}	u ₀		
	$[^{\circ}C]$	[m ²]	[m/s]		
1	25,80	0,10	0,22	CF	2
2	25,54	0,10	0,23	PF	5
3	26,60	0,23	0,21	CF	2
4	26,66	0,13	0,19	PF	5
5	25,59	0,13	0,27	PF	5
6	26,59	0,48	0,17	PF	5
7	23,92	0,19	0,24	CF	2
8	26,63	0,25	0,17	CF	2
9	26,42	0,25	0,19	CF	2
10	27,76	0,15	0,18	PF	5

Tabel 5.11: Parametre fra beregning af drivtryk og luftstråler for de 10 scenarier. CF = cirkulær fristråle og PF = plan fristråle.

Tabel 5.12 angiver resultater for luftstrømningernes indtrædelse i opholdszonen. Det ses, at hastigheden falder til et meget lavt niveau, hvilket skyldes lave indblæsningshastigheder. Alle lufthastigheder overholder komfortkravet til hastigheden i opholdszonen. Temperaturniveauet i luftstrålerne er lave og overholder kun temperaturkravet ud fra *Running mean* nederste grænse ved *scenarie 2* og *scenarie 8*.

Scenarie	Hastighed	Temperatur	Punkt	Hastighedskrav	Temperaturkrav
	u _{oz}	T_{oz}	(x,y)	u _{maks}	T _{nedre}
	[m/s]	$[^{\circ}C]$	[m;m]	[m/s]	[°C]
1	0,12	18,55	(2,5;1,8)	0,16	20,00
2	0,11	20,13	(0,6;1,8)	0,18	20,00
3	0,13	19,61	(3,83;1,8)	0,16	21,00
4	0,11	19,94	(0,6;1,8)	0,18	20,00
5	0,13	18,74	(0,6;1,8)	0,17	20,00
6	0,17	18,07	(0,6;1,8)	0,16	20,00
7	0,13	17,46	(3,89;1,8)	0,15	20,00
8	0,11	20,63	(3,78;1,8)	0,17	20,00
9	0,13	18,67	(3,77;1,8)	0,16	20,00
10	0,11	21,52	(0,6;1,8)	0,20	21,60

Tabel 5.12: Parametre for luftstrålernes indtrædelse i opholdszonen for de 10 scenarier.

5.7.3 Sammenligning af resultater

Sammenligning af scenarierne, for tvær- og opdriftsventilation i tabel 5.9 på side 63 og ensidet ventilation i tabel 5.12, viser stor forskel på luftindstrømningerne. Ved tvær- og opdriftsventilation er det største åbningsareal 0,077 m², mens det mindste ved enkeltsidet ventilation er 0,099 m², hvilket har stor indvirkning på luftstrømningens udvikling i køkkenalrummet, og betyder at hastigheden vil falde langsommere i luftstrålerne ved ensidet ventilation. Eftersom åbningsarealerne er meget større ved ensidet ventilation opnås lavere hastigheder i vinduesåbningen sammenlignet med tvær- og opdriftsventilation. Den største lufthastighed i vinduesåbningen ved ensidet ventilation er 0,27 m/s, mens den laveste for tvær- og opdriftsventilation er 0,56 m/s.

I figur 5.9 ses lufthastighed og lufttemperatur ved mulige kombinationer af vinduesåbninger for hvert scenarie med ensidet ventilation og tvær- og opdriftsventilation. Generelt er lufthastighederne og lufttemperaturne lavere for ensidet ventilation, da der er mindre drivtryk til rådighed. Hastighederne er et stykke under komfortkravet med hensyn til trækrisiko, mens lufttemperaturniveauet i de fleste tilfælde er under komfortniveauet. For kombinationsmulighederne ved ved tvær- og opdriftsventilation er de fleste lufthastigheder under grænsen for træk samtidig med, at lufttemperaturen i alle undtagen to tilfælde er 22°C eller derover.



Figur 5.9: Lufttemperatur og -hastighed ved opholdszonen for 90 vindueskombinationer. Blå angiver scenarierne for tvær- og opdriftsventilation og orange angiver scenarierne med ensidet ventilation.

Resultaterne for vinduesudluftningsscenarierne ved tvær- og opdriftsventilation angiver den mest optimale løsning i forhold til trækrisiko, sammenlignet med ensidet ventilation. Drivtrykket for tvær- og opdriftsventilation er større end ved ensidet ventilation, hvorved der opnås større lufthastigheder i vinduesåbningen. Resultaterne er også vist i bilag D på side 139 og E på side 141.

NUMERISK MODELLERING AF LUFTSTRØMNINGSFORHOLD

Kapitlet omhandler en analyse af numerisk modellering af luftstrømningsforhold, lufthastighedsog lufttemperaturniveau i køkken-alrummet. Analysen foretages på baggrund af CFD-simuleringer af strømningsforholdene for de 10 vinduesudluftningsscenarier. Formålet med analysen er at undersøge hastigheds- og temperaturniveauet i luftstråler samt deres betydning for indeklimaet i køkken-alrummet. Analysen udføres for de samme luftstrømningsscenarier, som blev bestemt i afsnit 5 på side 51.

Indledningsvis beskrives den anvendte beregningsmodel i CFD-modellerne. Herunder gennemgås modellernes geometri og testpunkterne, hvori lufthastigheds- og lufttemperaturniveauet ønskes undersøgt. Dernæst implementeres modellernes randbetingelser i form af overfladetemperaturer på køkken-alrummets afgrænsende flader, den konvektive varmestrøm fra personer samt randbetingelser for rummets vinduesåbninger. Der udarbejdes en netpunktsanalyse af CFD-modellerne for at sikre strømningsforholdenens uafhængighed af beregningsnettet. Analysen afsluttes med simuleringsresultater af lufthastigheds- og temperaturniveauet i testpunkterne samt strømningsforhold i køkken-alrummet ved de anvendte vinduesudluftningsscenarier.

Beregningsmodellen for luftstrømningsfeltet i køkken-alrummet opstilles i programmet FloVENT V9.3 som er et kommercielt program, der anvender CFD-teknikker til analyse af luftstrømningsforhold og varmeoverførsel i bygninger [Mentor Graphics Corporation, 2012]. For at validere FloVENT's egenskaber ved simulering af luftstrømningsforhold i ventilerede rum, og samtidig opnå større indsigt i beregningsmetoder bag CFD-simuleringer, har projektgruppen udarbejdet en CFD-Benchmark test, som kan ses i bilag H på side 157.

6.1 Opstilling af beregningsmodel

Dette afsnit beskriver modellen, som benyttes til numerisk beregning af luftstrømnings, hastigheds- og temperaturforhold i køkken-alrummet. Derudover gennemgåes fælles antagelser i beregningsmodellen, for CFD-simuleringerne af de 10 forskellige vinduesudluftningsscenarier.

6.1.1 Antagelser for CFD-simulering af strømningsforhold

Beregningsmodellen for luftstrømningsfeltet i køkken-alrummet opstilles, som nævnt, i FloVENT. Beregningerne af lufthastigheder, lufttemperaturer og strømningsforhold udføres som en stationær beregning. Ved stationær beregning udgår det tidsafhængige led i den generelle form af strømningsligningerne, som vist i bilag F på side 143. Derfor vil der ved konvergering af luftstrømningsparametrene opstå en ligevægt mellem luftstrømningerne genereret i vinduesåbningerne og luftstrømningerne, der forlader rummet. Dette muliggør det bedste sammenligningsgrundlag med de analytiske strømningsmodeller, som også beregnes under stationære betingelser. CFD-simuleringerne udføres i et tredimensionelt beregningsdomæne. Hermed beregnes i x-, yog z-komposantens retning: kontinuitetsligningen, som beskriver massestrømmen ind og ud af et givet kontrolvolumen, momentumligningerne, som beskriver hastighedsudviklingen i et kontrolvolumen, og energiligningen, som beskriver lufttemperaturudviklingen i et kontrolvolumen. Deruodver anvendes $k - \varepsilon$ turbulensmodel i alle CFD-simuleringer til beregning af turbulente strømningsfelter. Beskrivelse af $k - \varepsilon$ turbulensmodel samt den numeriske metode til beregning af luftstrømningsforholdene er vist i bilag F på side 143.

Alle CFD-simuleringerne udføres som ikke-isotermiske strømningssituationer, fordi udelufttemperaturniveauet i de 10 vinduesudluftningsscenarier er lavere end rumtemperaturen. Derfor er det vigtigt, at den numeriske beregningsmodel i CFD-simuleringerne er i stand til at simulere den termiske opdrift i luftstrømningsfeltet. Hertil anvendes idealgasligningen i CFD-simuleringerne, som muliggør ændring af luftens densitet i køkken-alrummet ved ændring af luftens temperaturniveau.

6.1.2 Konvergering af strømningsforhold

I en CFD-simulering itereres værdier for hvert punkt i beregningsnettet. Før en simuleringen er troværdig, i forhold til de givne randbetingelser, skal denne konvergere. Der findes to måder at opnå konvergering for luftstrømningsligningerne i beregningsdomænet for køkken-alrummet. Den første metode foreskriver at CFD-løsningen er konvergeret når variationen mellem antallet af iterationer for den pågældende variabel i et givet testpunkt er faldet til et acceptabelt niveau. Den anden metode, som også anvendes i CFD-simuleringerne af luftstrømningsforhold i køkken-alrummet, foreskriver, at CFD-løsningen er konvergeret når simuleringsfejlen for alle strømningsligningerne er faldet til et acceptabelt niveau. Simuleringsfejlen af den numeriske løsning på 1 anses som værende acceptabel [Mentor Graphics Corporation, 2012]. Den fastsatte simuleringsfejl på 1 i den numeriske beregningsprocedure angiver samtidig niveauet for konvergering af kontinuitetsligningen, momentumligningerne og energiligningen for luftstrømningerne i køkken-alrummet. En simuleringsfejl på 1 i den numeriske løsningsmetode svarer til en fejl på 0,5% i kontinuitetsligningen, momentumligningerne og energiligningen. I bilag L på side 187 angives simuleringsgrafer for to vinduesudluftningsscenarier samt beregningsgangen for simuleringsfejlen og konvergeringsniveau.

6.2 Beregningsgeometri og -net

CFD-modellen for køkken-alrummet opbygges som en fuldskala-model med samme geometri, som det faktiske køkken-alrum i BFL. For specifikationer af den geometriske opbygning af køkken-alrummet henvises til figur 4.2 på side 42. Figur 6.1 på modstående side viser 3D-modellen af køkken-alrummet med vinduesåbninger og døren til 1. salen, som er modellens udsugningsåbning.



Figur 6.1: 3D-visualisering af beregningsgeometrien for CFD-modellen af køkken-alrummet.

I FloVENT er det kun muligt at anvende et struktureret rektangulært beregningsnet i kartesiske koordinater [Mentor Graphics Corporation, 2012]. Derfor anvendes i alle CFD-simuleringerne et 3D-beregningsnet med celle-typen hexahedron. Det strukturede beregningsnet i FloVENT kan have en negativ effekt på beregningen af luftstrømningsforholdene de steder i beregningsdomænet, som kræver en høj opløsning grundet relative store ændringer i små områder. Derfor mindskes størrelsen af cellerne ved alle aktive vinduesåbninger. Hermed er det muligt at opnå en mere præcis og detaljeret beregning af strømningsforholdene ved vinduesåbningerne. I bilag L på side 187 viser figur L.1, L.2 og L.3 CFD-modellernes beregningsnet i henholdsvis XY-planet, ZY-planet og XZ-planet.

6.3 Randbetingelser

En models outputparametre kan højst opnå samme kvalitet som modellens inputputparametre. Derfor er designerens valg af inputparametre og randbetingelser vigtige elementer i forhold til at opnå en valid CFD-model, som ved simulering kan opnå resultater i overenstemmelse med faktiske hændelser.

Randbetingelserne til CFD-modellen findes ud fra simuleringer i BSim-modellen af køkkenalrummet, som er beskrevet i kapitel 3 på side 15. BSim enkeltzone-modellen er opstillet med bygningens faktiske geometri, termiske egenskaber for konstruktionselementer, interne varmebelastninger og klimatekniske systemer samt dertilhørende brugsmønster. Modellen består af køkken-alrummet, hvori varmeafgivelsen fra interne varmebelastninger, såsom personer og udstyr, er defineret som en samlet zonevarmebelastning uden hensyntagen til den faktiske geometri af de interne varmebelastninger. I simuleringsmodellen opdeles varmeafgivelsen fra personer i fri varme, hvilket yderligere opdeles i et konvektions- og strålingsbidrag, samt latent varme bundet i vanddamp. Strålingsbidraget fra de interne varmebelastninger fordeles ligeligt mellem de omsluttende overflader i køkken-alrummet. Derudover medregnes den konvektive varmebelastning på rumluften og konvektionen mellem rummets omsluttende overflader og luften i rummet. Beregningsproceduren i BSim medtager også varmebelastningen solstråling og varmeoverførelsen mellem modellens termiske zoner [Statens Byggeforskningsinstitut, 2011]. Alt dette bevirker, at det er muligt at opnå god overensstemmelse mellem simuleringsresultater fra BSim-modellen og de faktiske termiske forhold i køkken-alrummet.

Implementering af CFD-modellernes randbetingelser for afgrænsende flader, intern varmbelastning og vinduesåbninger gennemgåes i det følgende. Der anvendes de samme timeværdier, som blev brugt til at finde vinduesudluftningsscenarierne i afsnit 5 på side 51.

6.3.1 CFD-modellernes afgrænsende flader

Randbetingelserne for CFD-modellernes afgrænsende flader implementeres ved anvendelse af timeværdier fra BSim-enkeltzone modellen. For hver vinduesudluftningsscenarie anvendes overfladetemperaturer fra BSim-simulering, da der i programmet beregnes stråling for hver overflade. Dette er et positivt element, da det fjerner nødvendigheden for at aktivere strålingsmodellen i FloVENT, som selv ved simple beregningsnet kræver store computerressourcer og ofte medfører lange simuleringstider [Mentor Graphics Corporation, 2012].

BSim-modellen og CFD-modellerne af køkken-alrummet er opbygget på forskellige måder. BSimmodellen af køkken-alrummet er opbygget af 12 afgrænsende flader, hvorimod CFD-modellerne er opbygget af 27 afgrænsende flader. Derfor antages det, at nogle af overfladetemperaturerne i BSim-modellen dækker over flere flader i CFD-modellerne. Antagelser og værdier for randbetingelserne til CFD-modellernes afgrænsende flader kan ses på bilags-DVD.

6.3.2 CFD-modellernes vinduesåbninger

Der er opstillet en CFD-model for hvert vinduesudluftningsscenarie, som derfor anvender bestemte åbningskarakteristika for henholdsvis modellens facade- og tagvinduer. Randbetingelserne for hver vinduesudluftningsscenarie er bestemt ud fra opstilling af massebalancen for køkkenalrummet i afsnit 5 på side 51. Her blev temperatur- og hastighedsniveau samt åbningsareal i luftstrålerne fra vinduerne beregnet.

Vinduesåbningernes placering og luftstrømningsretning i CFD-modellerne er vist på figur 6.2 på næste side. Kombinationen af, hvilke vinduer, der er aktive i modellen, er angivet i afsnit 5 på side 51. I vinduesåbningerne i facaden og taget i CFD-modellerne implementeres luftindstrømningen med et specificeret temperatur- og hastighedsniveau. Der indsættes en vinkel på luftstrømningen i facadeåbningerne, hvilket er nødvendigt, da der i CFD-modellen ikke anvendes den reelle vinduesgeometri. I modellen er der indsat et vertikalt areal, svarende til det effektive areal, og derfor opnåes der ikke naturligt den opadrettede vinkel på luftstrømningen, som der ville optræde i virkeligheden. I CFD-simuleringerne antages strømningsvinklen for facadevinduerne at være parallel med loftet ved facadevinduerne.



Figur 6.2: 3D-visualisering af beregningsgeometrien for CFD-modellen af køkken-alrummet med strømningsretninger for vinduesåbningerne.

Figur 6.2 viser, at CFD-modellen indeholder 5 facadevinduer og 4 tagvinduer til vinduesudluftning. I afsnit 5 på side 51 er det beskrevet, at der i alle scenarier er udstrømning gennem tagvinduerne på nordsiden af BFL. Luftstrømmen skal passere åbningen mellem 1. sal og køkken-alrummet og derfor indsættes én udsugningsåbning i form af døren til 1. salen i CFD-modellen.

6.3.3 CFD-modellernes varmekilder

For alle CFD-modellerne er der antaget at være intern personbelastning. Der anvendes fire personmodeller til simulering af den konvektive varmeafgivelse fra personerne. Personmodellerne har samme konvektive varmeafgivelse som de fire personer i BSim enkelt-zone modellerne. I BSim-modellen er det antaget, at hver person i køkken-alrummet har et aktivitetsniveau på 2,0 met, svarende til middel aktivitet. Aktivitetsniveauet på 2,0 met svarer til en fri varmeafgivelse på 121 W/person. Eftersom BSim anvender en lige fordeling mellem strålings- og konvektionsbidraget for den frie varmeafgivelse, udregnes den konvektive varmeafgivelse til 60,5 W/person, hvilket giver en total konvektiv varmeafgivelse i rummet på 242 W. Tabel 6.1 angiver lokationen af personmodellerne, og figur 6.3 på den følgende side viser opbygning af personmodellerne i CFD-modellerne.

Personmodel	Koordinat (x,y,z)	
[—]	[m]	
1	(1,6;0;2,3)	
2	(2,7;0;2,3)	
3	(1,6;0;3,3)	
4	(2,7;0;3,3)	

Tabel 6.1: Koordinatsæt for fire personmodeller i CFD-modellerne.



Figur 6.3: 3D-visualisering af beregningsgeometrien for CFD-modellen af køkken-alrummet med personmodeller.

Figur 6.3 viser, at personmodellerne er opbygget som et rektankulær volumen. Denne opbygning af personmodellerne anvendes af hensyn til kvaliteten af beregningsnettet, som var nødsaget til at have en højere kvalitet og detaljeringsgrad ved mere komplekse personmodeller [Mentor Graphics Corporation, 2012].

6.4 Netpunktsanalyse

Netpunktsanalysen anvendes til validering af, at temperatur-, hastigheds- og strømningsforholdene i CFD-modellerne er uafhængige af størrelsen og kvaliteten på beregningsnettet. For at anskueliggøre temperatur- og strømningsfeltets afhængighed af beregningsnettets kvalitet er der opstillet 9 simuleringer med stigende celleantal i beregningsnettet. Netpunktsanalysen indledes med en CFD-model, som har et beregningsnet med meget ringe detaljeringsgrad. Herefter øges antallet af celler i modellens x-, y- og z-retning hvorved der opnåes et beregningsnet med højere detaljeringsgrad. Proceduren fortsættes indtil CFD-resultaterne er uafhængige af beregningsnettets kvalitet, som dog også afhænger af den tilgængelige computerressource.

Formålet med netpunktsanalysen er at kunne anvende det samme størrelse beregningsnet ved de forskellige CFD-modeller af vinduesudluftningsscenarier fra kapitel 5 på side 51. Eftersom alle scenarierne anvender forskellige randbetingelser med hensyn til vinduesåbningernes geometri, lufthastigheds- og temperaturniveau i vinduesåbningerne, overfladetemperaturer på modellens afgrænsende flader, bliver netpunktsanalysen udført med en række generelle randbetingelser ved CFD-simuleringerne.

For alle simuleringerne i netpunktsanalysen sættes temperaturniveauet i vinduesåbningerne til 20°C, hvormed der anvendes stofværdier for luften svarende til denne temperatur. Luftens densitet, specifikke varmekapacitet og dynamisk viskositet findes ved tabelopslag til henholdsvis 1,204 kg/m³, 1005 J/kg.°C og 1,82·10⁻⁵ N· s/m² [Munson et al., 2013]. For alle modellens afgrænsende

flader anvendes en overfladetemperatur på 25°C, som tidligere BSim-simuleringer af køkkenalrummet, har vist, er en realistisk gennemsnitsværdi for modellens overfladetemperaturer.

Der laves netpunktsanalyse for CFD-modellen ved en personbelastning på 4 personer. Modellens indblæsningsåbninger, som omfatter de fem facadevinduer og fire tagvinduer, er alle aktive under netpunktsanalysen. Strømningsretningen for facade- og tagvinduerne kan ses på figur 6.2 på side 73. I netpunktsanalysen anvendes en konstant indblæsningshastighed i facade- og tagvinduerne på 1 m/s, som sammen med vinduernes åbningsareal giver en volumenstrøm i vinduesåbningerne som vist i tabel 6.2. Volumenstrømmene er randbetingelser for indblæsnings- og udsugningsåbninger og opfylder kontinuitetsligningen og derved massebalancen i modellen.

	Åbningsareal	Volumenstrøm
	[m ²]	[m ³ /s]
Indblæsningsåbninger		
V1 venstre	0,266	0,266
V1 højre	0,266	0,266
V2 venstre	0,422	0,422
V2 center	0,422	0,422
V2 højre	0,422	0,422
V3 venstre	0,108	0,108
V3 højre	0,108	0,108
V4 venstre	0,108	0,108
V4 højre	0,108	0,108
Udsugningsåbning		
Dør	1,8	2,230

Tabel 6.2: Anvendte randbetingelser for vinduesåbningerne i netpunktsanalyse. Vinduesåbningernes placering kan ses på figur 4.1 på side 41

Tabel 6.3 på næste side viser en oversigt over antallet af simuleringer i netpunktsanalysen og den maksimale cellestørrelse i beregningsdomænet. Derudover viser tabellen cellens maksimale *aspect ratio*, som angiver forholdet mellem cellens bredde og højde afhængigt af det pågældende beregningsnet og er et udtryk for skævhed i en celle. FloVENT foreskriver en maksimal *aspect ratio* for cellen på 16 for at opnå stabile og valide CFD-resultater af strømningsfeltet [Mentor Graphics Corporation, 2012]. I netpunktsanalysen falder skævheden af beregningsnettet ved faldende cellestørrelse og *aspect ratio* er under 16, når modellens beregningsnet er på ca. 100000 celler.

Beregningsnet	Antal celler	Gennemsnitlig cellestørrelse	Maksimal aspect ratio
(x,y,z)[-]	[—]	(x,y,z)[mm]	[—]
(40x40x40)	64000	(114,00x131,77x150,00)	18,886
(50x50x50)	125000	(91,20x105,41x120,00)	13,383
(60x60x60)	216000	(76,00x87,84x100,00)	11,750
(70x70x70)	343000	(65,14x75,29x85,71)	9,500
(80x80x80)	512000	(57,00x65,88x75,00)	8,300
(90x90x90)	729000	(50,67x58,56x66,67)	7,333
(100x100x100)	1000000	(45,60x52,71x60,00)	6,527
(110x110x110)	1331000	(41,45x47,91x54,55)	5,929
(120x120x120)	1728000	(38,00x43,92x50,00)	5,280

Tabel 6.3: Karakteristika for beregningsnettet i hver simulering i netpunktsanalysen.

For at anskueliggøre lufttemperatur- og luftstrømningsfeltets afhængighed af beregningsnettets celleantal kontrolleres temperaturen og hastigheden i 45 testpunkter for de 9 simuleringer. Herved kan det afgøres, om der er opnået netpunktsuafhængighed for temperatur- og strømningsfeltet. Placeringen af de 45 testpunkter kan ses på figur 6.4. En mere præcis beskrivelse af placeringen af testpunkterne kan ses på figur M.3 på side 195 i bilag M på side 193. Testpunkterne er placeret jævnt fordelt i køkken-alrummet i, y = 1,8 m, hvilket angiver samme højde som rummets opholdszone. Koordinatsættene for de 45 testpunkter på randen af opholdszonen er angivet i tabel 6.4 på næste side.



(a) CFD-modellen set fra siden i XY-planet.
(b) CFD-modellen set oppefra i XZ-planet.
Figur 6.4: Illustration af CFD-model til netpunktsanalysen samt placering af 45 testpunkter på randen af opholdszonen.

Testpunkt	Koordinat (x,y,z)	Testpunkt	Koordinat (x,y,z)	Testpunkt	Koordinat (x,y,z)
[—]	[m]	[—]	[m]	[—]	[m]
opz1	(0,6;1,8;5,4)	opz16	(3,5;1,8;4,395)	opz31	(2;1,8;1,595)
opz2	(1;1,8;5,4)	opz17	(4;1,8;4,395)	opz32	(2,5;1,8;1,595)
opz3	(1,5;1,8;5,4)	opz18	(4,45;1,8;2,99)	opz33	(3;1,8;1,595)
opz4	(2;1,8;5,4)	opz19	(0,6;1,8;2,99)	opz34	(3,5;1,8;1,595)
opz5	(2,5;1,8;5,4)	opz20	(1;1,8;2,99)	opz35	(4;1,8;1,595)
opz6	(3;1,8;5,4)	opz21	(1,5;1,8;2,99)	opz36	(4,45;1,8;1,595)
opz7	(3,5;1,8;5,4)	opz22	(2;1,8;2,99)	opz37	(0,6;1,8;0,6)
opz8	(4;1,8;5,4)	opz23	(2,5;1,8;2,99)	opz38	(1;1,8;0,6)
opz9	(4,45;1,8;5,4)	opz24	(3;1,8;2,99)	opz39	(1,5;1,8;0,6)
opz10	(0,6;1,8;4,395)	opz25	(3,5;1,8;2,99)	opz40	(2;1,8;0,6)
opz11	(1;1,8;4,395)	opz26	(4;1,8;2,99)	opz41	(2,5;1,8;0,6)
opz12	(1,5;1,8;4,395)	opz27	(4,45;1,8;1,595)	opz42	(3;1,8;0,6)
opz13	(2;1,8;4,395)	opz28	(0,6;1,8;1,595)	opz43	(3,5;1,8;0,6)
opz14	(2,5;1,8;4,395)	opz29	(1;1,8;1,595)	opz44	(4;1,8;0,6)
opz15	(3;1,8;4,395)	opz30	(1,5;1,8;1,595)	opz45	(4,45;1,8;0,6)

Tabel 6.4: Koordinatsæt for 45 testpunkter på grænsen til køkken-alrummets opholdszone.

Udover de 45 testpunkter på grænsen af rummets opholdszone indsættes også 5 testpunkter over hver af de fire personmodeller, som ses på figur 6.5. Det første testpunkt placeres $\Delta y = 0,05$ m over personmodellerne og de næste placeres med en lodret afstand på 0,05 m. Dette gøres, for at få et indblik i temperatur og strømningsfeltets afhængighed af beregningsnettets kvalitet umiddelbart over personmodellerne. Hermed er det også muligt at undersøge den konvektive varmeafgivelse fra personmodellerne samt den termiske plumes udvikling midt over varmekilden i afhængighed af beregningsnettets kvalitet. Koordinatsættene for de 20 testpunkter over personmodellerne er angivet i tabel 6.5 på næste side, og kan ses på figur M.4 på side 196 og figur M.5 på side 196 i bilag M på side 193.



Figur 6.5: Illustration af CFD-modellen til netpunktsanalysen samt placering af 20 testpunkter over personmodellerne.

Testpunkt	Koordinat (x,y,z)	Testpunkt	Koordinat (x,y,z)
[—]	[m]	[—]	[m]
p1.1	(1,75;1,85;2,45)	p3.1	(1,75;1,85;3,425)
p1.2	(1,75;1,90;2,45)	p3.2	(1,75;1,90;3,425)
p1.3	(1,75;1,95;2,45)	p3.3	(1,75;1,95;3,425)
p1.4	(1,75;2,00;2,45)	p3.4	(1,75;2,00;3,425)
p1.5	(1,75;2,05;2,45)	p3.5	(1,75;2,05;3,425)
p2.1	(2,83;1,85;2,45)	p4.1	(2,83;2,05;3,425)
p2.2	(2,83;1,90;2,45)	p4.2	(2,83;2,05;3,425)
p2.3	(2,83;1,95;2,45)	p4.3	(2,83;2,05;3,425)
p2.4	(2,83;2,00;2,45)	p4.4	(2,83;2,05;3,425)
p2.5	(2,83;2,05;2,45)	p4.5	(2,83;2,05;3,425)

Tabel 6.5: Koordinatsæt af 20 testpunkter placeret over fire personmodeller i køkken-alrummet.

6.4.1 Simuleringsresultater

Simuleringsresultaterne i netpunktsanalysen anvendes til at belyse indflydelsen af beregningsnettets kvalitet på simuleringen af temperatur- og strømningsfeltet i køkken-alrummet med den påførte personbelastning fra de fire simple personmodeller. Først analyseres ændringen i luftstrømningens hastighed- og temperaturniveau for de første 15 testpunkter på grænsen af rummets opholdszone. Simuleringsresultaterne for de resterende 30 testpunkter på grænsen af opholdszonen kan ses i bilag G på side 147. Dernæst analyseres ændringerne i hastigheds- og temperaturniveauet for de 20 testpunkter placeret over personmodellerne i køkken-alrummet.

Beregningsnettets indflydelse på temperatur- og strømningsfeltet i testpunkterne på grænsen af opholdszonen

Figur 6.6 på modstående side viser ændringen i hastighedsniveauet for testpunkterne opz1-opz15 afhængigt af beregningsnettets størrelse. For testpunkterne opz1-opz7 og opz10-opz15 ses en meget lille ændring i hastighedsniveauet afhængigt af modellens celleantal. Hastighederne i disse punkter er tæt på at være konstante uafhængigt af celleantallet i modellen. Derimod er hastighedsniveauet og ændringen i testpunkterne opz8 og opz9 markant større sammenlignet med de andre testpunkter på grænsen af opholdsonen. Dette skyldes, at luftstrålen fra facadevinduerne og fra tagvinduerne bryder hinandens baner over opholdzonen, og dernæst indtræder rummets opholdszone omkring disse to testpunkter. Generelt viser figur 6.6 på næste side, at luftstrømningernes hastighedsniveau i modellen er uafhængigt af beregningsnettets størrelse ved et celleantal på ca. 700000 celler.



Figur 6.6: Celleantallets indflydelse på hastigheden i testpunkterne opz1-opz15 med koordinaterne som angivet i tabel 6.4 på side 77.

Figur 6.7 på den følgende side viser ændringen i lufttemperaturniveauet for testpunkterne opz1opz15 afhængigt af beregningsnettets størrelse. Generelt er temperaturniveuet for testpunkterne i intervallet 20,7-21,2°C. Derimod er temperaturen for testpunkterne opz8 og opz9 lavere sammenlignet med temperaturen i de andre testpunkter, hvilket igen skyldes at testpunkterne er placeret i luftstrålens indtrædelse i opholdszonen. Figur 6.7 på næste side viser den samme tendens som figur 6.6, at luftstrømningernes temperaturniveau i modellen er uafhængigt af beregningsnettets størrelse ved et celleantal på ca. 700000 celler.



Figur 6.7: Celleantallets indflydelse på lufttemperaturen i testpunkterne opz1-opz15 med koordinaterne som angivet i tabel 6.4 på side 77.

Figur 6.8 på næste side viser CFD-simulering af hastighedsfeltet i køkken-alrummet i XYplanet (Z=5,5m) for et facadevindue og to tagvinduer. Figuren angiver hastighedsfeltet i rummet for CFD-simuleringen med det ringeste beregningsnet i netpunktsanalysen på 64000 celler samt CFD-simulering med et beregningsnet på 729000 celler, som er vurderet til det mindste beregningsnet, hvor lufttemperatur- og luftstrømningsfeltet er uafhængig af netstørrelsen. Specielt i vinduesåbningerne ses forskellen på detaljeringsgraden ved de anvendte beregningsnet. Ved CFD-simuleringen med et beregningsnet på 64000 celler er det svært bare at afgrænse området, hvor luften strømmer ind fra tagvinduerne. Derudover ses det, at luftstrålerne fra facadevinduerne smelter sammen med luftstrålerne fra tagvinduerne over opholdszonen for derefter at indtræde opholdszonen bagerst i rummet. Dette faktum understøttes af de generelt højere lufthastigheder og lavere lufttemperaturer i testpunkterne bagerst i køkken-alrummet.



Figur 6.8: Visualisering af lufthastighedsfeltet i køkken-alrummet ved interpolering mellem celleværdierne i XY-planet (Z=5,5 m). (1) angiver resultat for beregningsnet med 40x40x40 = 64000celler, og (2) angiver resultat for beregningsnet på 90x90x90 = 729000 celler.

Beregningsnettets indflydelse på temperatur- og strømningsfeltet i testpunkterne over varmekilderne

Figur 6.9 viser ændringen i hastighedsniveauet for testpunkterne over personmodellerne afhængigt af beregningsnettets størrelse. Det ses, at luftstrømningernes hastighedsniveau i modellen er uafhængigt af beregningsnettets størrelse ved et celleantal på ca. 700000 celler.



Figur 6.9: Celleantallets indflydelse på hastigheden i testpunkterne p1.1-p1.5, p2.1-p2.5, p3.1-p3.5 og p4.1-p4.5 med koordinaterne som angivet i tabel 6.5 på side 78.

Figur 6.9 på foregående side viser ændringen i lufttemperaturniveauet for testpunkterne over personmodellerne afhængigt af beregningsnettets størrelse. Igen viser CFD-simuleringerne at lufttemperaturniveauet er uafhængigt af beregningsnettets størrelse ved et celleantal på ca. 700000 celler. Derudover viser figuren en generelt højere lufttemperatur i testpunkterne p1.1, p.2.1, p3.1 og p4.1 sammenlignet med den simulerede lufttemperatur i de resterende testpunkter. Dette er også forventeligt eftersom de er placeret tættere på personmodellerne, og dermed er udsat for en konvektiv varmetransport genereret af personmodellerne.



Figur 6.10: Celleantallets indflydelse på temperaturen i testpunkterne p1.1-p1.5, p2.1-p2.5, p3.1-p3.5 og p4.1-p4.5 med koordinaterne som angivet i tabel 6.5 på side 78.

Figur 6.11 på modstående side viser lufthastighedsfeltet omkring personmodellerne i XYplanet (Z=3,5 m). Det ses, at der i strømningsfeltet opstår lavere lufthastigheder omkring personmodellerne, hvilket skyldes placeringen af personmodellerne midt i køkken-alrummet. Eftersom tagvinduerne er placeret yderligt i køkken-alrummets tagkonstruktion er påvirkningen fra luftstrålerne i tagvinduerne mindre på personmodellerne, hvormed kun lufthastighederne fra facadevinduerne har en indvirkning på luftstrømningen omkring personmodellerne.



Figur 6.11: Visualisering af lufthastighedsfeltet i køkken-alrummet ved interpolering mellem celle-værdierne i XY-planet (Z=3,5 m). (1) angiver resultat for beregningsnet på 40x40x40 = 64000 celler, og (2) angiver resultat for beregningsnet på 90x90x90 = 729000 celler.

Figur 6.12 viser temperaturfeltet omkring personmodellerne i XY-planet (Z=3,5 m) ved et beregningsnet på henholdsvis 64000 celler og 729000 celler. Det ses, at temperaturniveauet i indblæsningsåbningen er ca. 20 °C, og overfladetemperaturen på modellens afgrænsende flader er 25 °C, som er valgt som randbetingelse i netpunktsanalysen. Det ses, at CFD-simuleringen med et beregningsnet på 64000 celler overestimerer varmetransporten fra modellens afgrænsende flader til luftstrømningen i rummet sammenlignet med modellen med et beregningsnet på 729000 celler. Figuren viser også temperaturudviklingen i den termiske plume, som er genereret af den konvektive varmeafgivelse fra personmodellerne. Detaljeringsgraden og strømningsmønstret i den termiske plume anskueliggør igen forskellen på de to beregningsnets egenskaber i form af estimering af strømningsforholdene i køkken-alrummet.



Figur 6.12: Visualisering af lufttemperaturfeltet i køkken-alrummet ved interpolering mellem celle-værdierne i XY-planet (Z=3,5 m). (1) angiver resultat for beregningsnet på 40x40x40 = 64000 celler, og (2) angiver resultat for beregningsnet på 90x90x90 = 729000 celler.

Netpunktsanalysen viser, at der er opnået netpunktsuafhængighed for lufttemperatur- hastighedsog strømningsforholdende i angivne 45 testpunkter på grænsen af opholdszonen og 5 testpunkter over hver af de fire personmodeller. Netpunktsuafhængigheden indtræder ved et beregningsnet med 729000 celler og dermed anvendes denne størrelse af beregningsnettet i CFD-modellerne for vinduesudluftningsscenarierne.

6.5 Simuleringsresultater

I dette afsnit beskrives og analyseres CFD-simuleringsresultater for temperatur- hastigheds og strømningsfeltet i køkken-alrummet. Der er udført CFD-simuleringer for alle 10 vinduesudluftningsscenarier. I analysen fokuseres på vinduesudluftningsscenarie 5 og 9, fordi de anvender henholdsvis facade- og tagvinduer til vinduesudluftning. CFD-simuleringsresultater af hastigheds- og temperaturfeltet samt komfortniveauer for alle 10 vinduesudluftningsscenarier kan ses i henholdsvis bilag I på side 173, bilag J på side 177 og bilag K på side 181.

Det ønskes indledningsvis at undersøge luftstrålerne for de 10 scenarier kvantitativt. Dette gøres ved at analysere hastigheds- og temperaturudviklingen i luftstrålernes bane ved CFD-simulering af luftstrømningsforhold. Derudover analyseres luftstrålernes udvikling i køkkenalrummet kvalitativt ud fra 3D-visualiseringer af strømningsforholdene ved numerisk beregning. Endvidere ønskes det at undersøge luftstrålernes betydning for den samlede vurdering af indeklimaet i køkken-alrummet. Derfor beregnes og analyseres også PMV- og PPD-indekser. Hermed giver CFD-simuleringsresultaterne både et lokalt og globalt indblik i luftstrålernes indvirken på køkken-alrummets indeklima. Beregningen af PMV- og PPD-indekset udføres i FloVENT, eftersom programmet anvender samme beregningsprocedure af PMV- og PPD-indekser kan ses i bilag A på side 115. I FloVENT beregnes værdien for PMV- og PPD-indekset i centrum af hver celle i beregningsnettet. Hermed er det muligt at evaluere luftstrålernes indvirken på indeklimaet i hele CFD-modellen af køkken-alrummet. I beregningen af PMV-indekset for køkken-alrummet er der antaget en varmebeklædningsisolans på 1 clo og et aktivitetsniveau på 2 met for personerne i rummet.

6.5.1 Vinduesudluftningsscenarie 5

I vinduesudluftningsscenarie 5 anvendes facadevinduerne til vinduesudluftning. I bilag L på side 187 angiver figur L.4 på side 190 simuleringsgrafer for vinduesudluftningsscenarie 5. Figuren viser at variablerne i simuleringen er konvergeret med undtagelse af temperaturen, som antager en konstant meget lille fejlværdi i den numeriske løsningsmetode.

For vinduesudluftningsscenarie 5 er lufthastigheds- og lufttemperaturniveauet i vinduesåbningerne beregnet ved strømningsligningerne til henholdsvis 1,38 m/s og 11,8°C i afsnit 5.5.1 på side 57. Figur 6.13 på næste side viser simuleringsresultater for hastighedsudviklingen i centrum af luftstrålen fra facadevinduerne. På grund af indblæsningsvinklen i vinduesåbningen og coandaeffekten bevæger luftstrålen sig langs loftet i køkken-alrummet og danner en opadrettet vægstråle. Luftstrålen har en indtrængningslængde på ca. 0,7 m langs væggen, hvorefter den slipper loftet og former en fri luftstråle. Her får medrivning af eksisterende rumluft i kombination med de termiske kræfter strålen til at tabe momentum og dermed falde mod opholdszonen. Figur 6.13 på modstående side viser også, at lufthastighedsniveauet på grænsen til opholdszonen ligger i intervallet 0-0,2 m/s, hvilket er acceptabelt, i størstedelen af rummet. Hastighedsniveauet i luftstrålen ved indtrædelse i opholdszonen ligger i intervallet 0,2-0,3 m/s, hvilket er for højt i forhold til komfortgrænserne angivet i bilag A på side 115. Hermed opstår risiko for træk i områderne, hvor luftstrålen rammer opholdszonen.



Figur 6.13: Visualisering af lufthastighedsfeltet i køkken-alrummet ved interpolering mellem celle-værdierne for scenarie 5.

Figur 6.14 angiver temperaturudviklingen i luftstrålen fra facadevinduerne. Luften strømmer ind med en temperatur på 17,5°C i forhold til rummets gennemsnitstemperatur på 22,59°C. Efter luftstrålen har forladt loftet stiger temperaturen i strålen på grund af medrivning af rumluften. Derfor er temperaturniveauet i luftstrålen ca. 18,5°C ved indtrædelse i rummets opholdszone. Modsat hastighedsfeltet på grænsen af opholdszonen er temperaturfeltet mere ensartet med en gennemsnitstemperatur på 22,89°C.



Figur 6.14: Visualisering af lufttemperaturfeltet i køkken-alrummet ved interpolering mellem celleværdierne for scenarie 5.

Figur 6.15 på næste side viser beregnede PMV-værdier for scenarie 5 i rumhøjderne 0,1 m, 0,6

m, 1,1 m og 1,7 m. Disse højder anvendes til måling og evaluering af det termiske indeklima i opholdszonen [SBi 130, 1983]. Figuren viser, at det beregnede PMV-indeks er i intervallet 0-0,5 hvilket angiver et *let varmt* niveau for det termiske indeklima, som anses for acceptabelt for husets beboere. Derudover viser figuren, at PMV-værdierne stiger med rumhøjden, hvilket skyldes en lille temperaturgradient i køkken-alrummet ved scenarie 5.



Figur 6.15: Visualisering af PMV-indeks i køkken-alrummet ved interpolering mellem celleværdierne for scenarie 5.

Beregnede PPD-værdier kan ses i figur 6.16 på modstående side. Generelt viser PPD-indekset i de angivne højder en uensartet fordeling. PPD-indekset er lavt i områderne, hvor luftstrålerne rammer opholdszonen med 3-6% forventet utilfredse, hvilket er acceptabelt for personerne i rummet. I områderne udenfor luftstrålerne er PPD-indekset i intervallet 6-9% forventet utilfredse, hvilket skyldes vinduesudluftningsstrategien, som er bestemt af antallet af aktive vinduer, vinduernes åbningsareal og luftstrålens hastigheds- og temperaturniveau.



Figur 6.16: Visualisering af PPD-indeks i køkken-alrummet ved interpolering mellem celleværdierne.

Figur 6.17 på næste side viser et 3D-billede af strømnningslinjerne fra facadevinduerne, som er tangentlinjer til strømningens hastighedsvektorer. Der er 3 aktive vinduer i scenarie 5, og de er implementeret i CFD-modellen med samme effektive åbningsareal som i beregningen af de analytiske strømningsligninger. Figuren viser hvordan strømningslinjerne genereres i facadeåbningerne, og derefter følger loftet ind i køkken-alrummet. Luftstrålen falder ned i starten af opholdszonen og følger gulvet mod rummets bagvæg, hvilket resulterer i en ringe luftrecirkulation og dermed ringe opblanding med eksisterende rumluft. Dog viser figuren også, at hastighedsniveauet i luftstrålen efter indtrædelse i rummets opholdszone, er på et acceptabelt niveau i forhold til komfortgrænserne angivet i tabel 7.1 på side 100.



Figur 6.17: 3D-visualisering strømningslinjer fra facadevinduerne i vinduesudluftningsscenarie 5.

6.5.2 Vinduesudluftningsscenarie 9

I scenarie 9 anvendes de øverste tagvinduer til vinduesudluftning. I bilag L på side 187 angiver figur L.5 på side 191 simuleringsgrafer for vinduesudluftningsscenarie 9. Figuren viser, at alle variablerne i simuleringen er konvergeret med en simuleringsfejl på 1.

I afsnit 5.6.1 på side 62 er lufthastigheds- og lufttemperaturniveauet i vinduesåbningerne beregnet til henholdsvis 0,63 m/s og 14,6°C. Figur 6.18 på modstående side viser hastighedsudviklingen i luftstrålerne ved anvendelse af tagvinduerne til vinduesudluftning. Luftstrålen fra facadevinduerne former en cirkulær fristråle, hvor hastigheden i centrum af luftstrålen aftager mod opholdszonen. Det ses, at luftstrålen rammer bagvæggen af rummet og falder lodret mod gulvet, hvor strålen afbøjes og strømmer langs gulvet. Hastigheden falder i starten af strålen, mens den stiger når strålen falder lodret. Figuren viser også, at luftstrålen udvider sig på grund af medrivning af eksisterende rumluft, hvorfor strålen får et større tværsnitsareal ved indtrædelse i opholdszonen.

Figur 6.18 på næste side viser, at lufthastighedsniveauet på grænsen til opholdszonen ligger i intervallet 0-0,2 m/s, hvilket er acceptabelt i størstedelen af rummet. Hastighedsniveauet i luftstrålen ved indtrædelse i opholdszonen ligger i intervallet 0,2-0,4 m/s, hvilket er for højt i forhold til komfortgrænserne angivet i bilag A på side 115. Hermed opstår der risiko for træk i områderne, hvor luftstrålen rammer opholdszonen. Endvidere viser figuren, at luftstrålen oplever en hastighedsstigning ved indtrædelse i opholdszonen, fordi den rammer rummets bagvæg, hvormed der sker en kontraktion af dens oprindelige tværsnitsareal.



Figur 6.18: Visualisering af lufthastighedsfeltet i køkken-alrummet ved interpolering mellem celle-værdierne for scenarie 9.

Figur 6.19 viser temperaturudviklingen i luftstrålen fra tagvinduerne. Det ses, at luftstrålen har en undertemperatur på 14,6°C i forhold til rummets gennemsnitstemperatur på ca. 20°C. På grund af medrivning af rumluften stiger temperaturen i luftstrålen hastigt mod opholdszonen. Derfor er temperaturniveauet i luftstrålen ca. 19°C ved indtrædelse i rummets opholdszone. Modsat hastighedsfeltet på grænsen af opholdszonen er temperaturfeltet mere ensartet med en gennemsnitstemperatur på 20,1°C.



Figur 6.19: Visualisering af lufttemperaturfeltet i køkken-alrummet ved interpolering mellem celle-værdierne for scenarie 9.

PMV-indekset beregnet i FloVENT kan ses i figur 6.20 på den følgende side. Generelt er værdierne for PMV-indekset i intervallet [-0,5;0,5] i de angivne rumhøjder. PMV-indekset på 0 angiver et *neutralt* temperaturniveau, og derfor anses PMV-indekset som værende acceptabelt for opholdszonen. Derimod er værdien for PMV-indekset beregnet til -1 i området, hvor luftstrålen indtræder opholdszonen. Denne værdi angiver niveauet *let køligt*, og anses derfor som værende uacceptabelt hvis beboerne opholder sig i dette område.



Figur 6.20: Visualisering af PMV-indeks i køkken-alrummet ved interpolering mellem celleværdierne for scenarie 9.

I figur 6.21 på næste side ses størrelsesordenen af det beregnede PPD-indeks. Ligesom ved beregningen af PMV-indekset er der forskel i beregningen for PPD i området for luftstrålens indtrædelse i rummets opholdszone og det resterende område af opholdszonen. Generelt er værdien for PPD-indekset i de angivne rumhøjder i intervallet 4-9% forventet utilfredse, hvilket anses for acceptabelt. Derimod er PPD i området hvor luftstrålen rammer opholdszonen beregnet til 12-16% forventet utilfredse, hvilket falder udenfor indeklimakategori II.



Figur 6.21: Visualisering af PPD-indeks i køkken-alrummet ved interpolering mellem celleværdierne for scenarie 9.

Figur 6.22 på den følgende side viser et 3D-billede af strømnningslinjerne fra tagvinduerne. Der er 2 aktive vinduer i scenarie 9. Figuren viser hvordan strømningslinjerne i tagåbningerne følger rummets bagvæg ned mod opholdszonen og gulvet, og derfra videre op af rummets sydfacade og loft. Dette resulterer i en god luftrecirkulation i rummet, og dermed god opblanding med eksisterende rumluft. Dog viser figuren også, at hastighedsniveauet i luftstrålen efter indtrædelse i rummets opholdszone, ikke er på et acceptabelt niveau i forhold til komfortgrænserne angivet i tabel 7.1 på side 100.



Figur 6.22: 3D-visualisering strømningslinjer fra facadevinduerne i vinduesudluftningsscenarie 9.

6.6 Dimensionsløse luftstrømningsparametre

I dette afsnit undersøges karakteristiske luftstrømningsparametre for resultater opnået ved numerisk beregning af de 10 vinduesudluftningsscenarier. De karakteristiske luftstrømningsparametre er Reynolds-tal (Re) og Archimedes-tal (Ar). Derudover analyseres betydningen af forskellige Archimedes-tal (Ar-tal) for luftstrålerne ved scenarie 4 og 5.

6.6.1 Reynolds-tal

Luftstrømninger i ventilerede rum har ofte et højt Re-tal, hvorfor der i scenarierne af luftstrømningsforhold i køkken-alrummet antages fuldt udviklet turbulent strømning [Nielsen et al., 2007]. Det er svært at vurdere, hvornår der opstår fuldt udviklet turbulent strømning i luftstråler. Flere studier af luftstråler, genereret af mekaniske indblæsningsåbninger, viser dog, at et kritisk Re-tal på enten 2000 eller 4000 og højere, medfører fuldt udviklet turbulent strømning i luftstråler [Etheridge and Sandberg, 1996]. Re-tallet udtrykker forholdet mellem luftens inertikræfter og viskose kræfter, og er givet ved ligning 6.1.

$$Re = \frac{l \cdot u_0}{v} \tag{6.1}$$

Hvor:

Re Reynolds-tal [-] *l* Karakteristisk længde [m] *u*₀ indblæsningshastighed [m/s]

v Kinematisk viskositet $[m^2/s]$

I beregningerne for Re-tallet er den karakteristiske længde udregnet som kvadratroden af

indblæsningsarealet, $l = \sqrt{a_0}$, og den kinematisk viskositet er bestemt til $1,53 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ svarende til en temperatur på 20°C. Det beregnede Re-tal for hvert scenarie kan ses i tabel 6.6, som viser, at hvert scenarie har et Re-tal der er højere end 4000, hvormed det antages, at der vil opstå fuldt udviklet turbulent strømning i køkken-alrummet.

Scenarie	Indblæsningshastighed	Re-tal
	[m/s]	[-]
1	0,79	8643
2	1,18	15040
3	0,62	11249
4	1,37	12018
5	1,38	12761
6	1,18	20558
7	0,65	11324
8	0,56	10160
9	0,63	11281
10	1,17	11602

Tabel 6.6: Re-tal for 10 vinduesudluftningsscenarier.

Eftersom beregningerne af luftstrålernes Re-tal er over et niveau på 4000 antages fuldt udviklet turbulent strømning i køkken-alrummet. Derfor antages det at luftstrømningerne i scenarierne er uafhængigt af Re-tallet, hvormed luftstrømningerne kan beskrives ved Ar-tallet [Etheridge and Sandberg, 1996].

6.6.2 Archimedes-tal

Formålet med at vurdere, om der vil opstå fuldt udviklet turbulent strømning i køkken-alrummet er, at ved denne strømningsform er det muligt at beskrive luftstrømningsfeltet i køkken-alrummet ud fra Ar-tallet [Nielsen et al., 2007]. Ar-tallet udtrykker forholdet mellem de termiske kræfter og momentumkræfterne i luftstrømningen, og er givet ved ligning 6.2. Der er beregnet Ar-tal for hvert scenarie. Ligesom ved beregningen af Re-tallet beregnes den karakteristiske længde i Artallet som kvadratroden af indblæsningsarealet, og der anvendes samme indblæsningshastighed. Temperaturdifferensen beregnes som forskellen mellem indblæsningstemperatur, som er defineret som randbetingelse for luftstrålerne fra facadevinduerne, og udsugningstemperatur, som er en middelværdi på baggrund af 6 testpunkter i udsugningen i CFD-modellerne. Tyngdeaccelerationen sættes til 9,82 m/s² og den termiske ekspansionskoefficient sættes til 33,3 · 10⁻⁴ 1/C° [Munson et al., 2013].

$$Ar = \frac{\beta \cdot g \cdot l \cdot \Delta T_0}{u_0^2} \tag{6.2}$$

Hvor:

- Ar Archimedes-tallet [-]
- β Termisk ekspansionskoefficent [1/°C]
- g Tyngdeacceleration [m/s²]
- *l* Karakteristisk længde [m]
- ΔT_0 | Temperaturdifferens mellem indblæsnings- og udsugningsluft [°C]
- *u*₀ Indblæsningshastighed [m/s]

Tabel 6.7 angiver beregnede Ar-tal for de 10 scenarier.

Scenarie	Indblæsningshastighed	ΔT_0	Ar-tal
	[m/s]	$[^{\circ}C]$	[-]
1	0,79	12,31	0,108
2	1,18	9,61	0,044
3	0,62	10,60	0,250
4	1,37	11,64	0,027
5	1,38	13,46	0,033
6	1,18	7,86	0,049
7	0,65	11,48	0,237
8	0,56	8,91	0,258
9	0,63	10,57	0,238
10	1,17	10,25	0,037

Tabel 6.7: Ar-tal for 10 vinduesudluftningsscenarier.

Figur 6.23 viser CFD-simuleringer af hastighedsfeltet i centrum af luftstrålerne for vinduesudluftningsscenarie 4 og 5. Figuren viser betydningen af Ar-tallet for luftstrømningsforholdene i køkken-alrummet. Det ses, at luftstrålen fra facadevinduerne ved scenarie 5 har en reduceret indtrængningslængde sammenlignet med scenarie 4. Dette skyldes, at scenarie 4 har et lavere Ar-tal sammenlignet med scenarie 5. Dermed er momentumkræfterne i luftstrålen stærkere end de termiske kræfter for scenarie 4 sammenlignet med scenarie 5.



Scenarie 4. v_0 =1,37 m/s, T_0 =14,7°C ΔT_0 =11,64°C, Re=12018,01 og Ar=0,027.

Scenarie 5. v_0 =1,38 m/s, T_0 =11,8°C ΔT_0 =13,46°C, Re=12760,56 og Ar=0,033.

Figur 6.23: Visualisering af lufthastighedsfeltet i køkken-alrummet for scenarie 4 og 5.

SAMMENLIGNING AF LUFTSTRØMNINGSFORHOLD

Dette kapitel omhandler en sammenligning af resultater opnået ved beregning ud fra analytiske strømningsligninger og numerisk modellering af luftstrømningsforhold i køkken-alrummet for de 10 vinduesudluftningsscenarier. Sammenligningen omfatter både de beregnede luftstrømninger i form af hastigheds- og temperaturudvikling og antagelserne, som ligger til grund for disse. Slutteligt vurderes luftstrømningernes kølingspotentiale i køkken-alrummet.

7.1 Luftstrålernes hastigheds- og temperaturudvikling

I dette afsnit sammenlignes hastigheds- og temperaturniveauet i luftstrålerne for de 10 vinduesudluftningsscenarier ved analytiske strømningsligninger og numerisk beregning. I CFD-modellerne er lufthastighed og temperaturniveau aflæst i centrum af luftstrålerne. Beregningsproceduren for hastigheds- og temperaturudviklingen i centrum af luftstrålerne for analytiske strømningsligninger er vist i afsnit 5 på side 51.

7.1.1 Ventilationsstrategi 1 - Facadevinduer

Figur 7.1 på den følgende side viser hastighedsudviklingen i centrum af luftstrålerne for scenarierne med aktive facadevinduer. For både de analytiske strømningsligninger og numerisk beregning af luftstrålerne kan det ses, at hastighedsniveauet i centrum af luftstrålerne falder, når afstanden til vinduesåbningen øges. Generelt ses en acceptabel korrelation mellem hastighedsniveauet i luftstrålerne for strømningsligningerne og numerisk beregning. Dog viser scenarie 6 og scenarie 10 en stor afvigelse mellem de to beregningsmetoder, som skyldes den konstante hastighedskerne. Med de analytiske strømningsligninger er længden af den konstante hastighedskerne i luftstrålerne overestimeret i forhold til de numeriske beregninger. Den lange konstante hastighedskerne medfører højere hastigheds og temperaturniveau i luftstrålerne for scenarie 6 og 10. Samtidig viser figuren, at hastigheden ved beregning ud fra strømningsligningerne falder i hele strålens forløb inden indtrængen til opholdszonen. Det samme er ikke gældende ved de numeriske beregninger, hvor hastigheden for scenarie 2, 4 og 10 stabiliserer efter ca. 0,7 m i luftstrålens længderetning, mens det for scenarie 5 er efter ca. 1 m. For scenarie 6 falder hastigheden både ved strømningsligninger og numerisk beregning i hele strålens længde til opholdszonen.



Figur 7.1: Hastighedsudvikling i centrum af luftstrålerne for vinduesudluftningsscenarier med facadevinduer ved analytisk og numerisk beregning.

Figur 7.2 på næste side viser temperaturudviklingen i centrum af luftstrålerne for scenarierne med facadevinduerne. Generelt stiger temperaturen i luftstrålerne, når afstanden til vinduesåbningerne øges, mod rumtemperaturniveauet i det pågældende scenarie. Temperaturniveauet er generelt lavere ved CFD-beregninger end ved strømningsligningerne. Dette stemmer overens med, at hastighedsniveauet er højere for CFD-beregningerne.



Figur 7.2: Temperaturudvikling i centrum af luftstrålerne for vinduesudluftningsscenarier med facadevinduer ved analytisk og numerisk beregning.

Den konstante hastighedskerne er længere ved beregning med strømningsligningerne end ved numerisk beregning. Dette kan skyldes, at der i beregning med strømningsligningerne ikke er fastsat en polafstand x_0 , som er et udtryk for et fiktivt udbredelsesstartpunkt af luftstrålen. Dette kan normalt findes ved at foretage målinger for det pågældende luftstrømningsarmatur [Stampe, 2000].

Det højere hastighedsniveau og lavere temperaturniveau i CFD-beregningerne kan skyldes, at der er mindre opblanding med omkringliggende luft i CFD-beregning end det er antaget i strømningsligningerne. I strømningsligningerne indgår dette led som K_a-værdien, som i projektet er fastsat til en middelværdi af værdier opgivet i litteratur. K_a-værdien afhænger af luftstrømningsarmaturets udformning, hvilket i dette projekt er vinduesudformningen. Forskellen kan derfor skyldes, at der er forskel mellem antagelserne bag valget af K_a-værdi og den måde, som indblæsningen indgår i CFD-modellen. K_a-værdien er valgt ud fra litteratur for et bundhængt vindue, men da der i indblæsningsformen i CFD-modellen ikke tages hensyn til vinduesudformningen, svarer indblæsningen højst sandsynligt mere til et traditionelt indblæsningsarmatur og en K_a-værdi i intervallet 2-5 [Heiselberg et al., 2001].

7.1.2 Ventilationsstrategi 2 - Tagvinduer

Figur 7.3 på den følgende side viser hastighedsudviklingen i centrum af luftstrålerne for scenarierne med aktive tagvinduer. Ligesom for facadevinduerne aftager hastigheden i tagvinduerne med afstanden til vinduesåbningerne. Derudover ses det, at den konstante hastighedskerne i strømningsligningerne er længere end luftstrålerne ved CFD-beregning. Endvidere viser figuren, at luftstrålerne ved numerisk beregning har et højt hastighedsniveau ved indtrængen i opholdszonen sammenlignet med strømningsligningerne.



Figur 7.3: Hastighedsudvikling i centrum af luftstrålerne for vinduesudluftningsscenarier med tagvinduer ved analytisk og numerisk beregning.

Figur 7.4 på næste side viser temperaturudviklingen i luftstrålerne for tagvinduerne. Igen kan det ses, at temperaturen i centrum af luftstrålerne stiger med afstanden til vinduesåbningerne. Derudover opnår strømningsligningerne et højere temperaturniveau sammenlignet med numerisk beregning af luftstrålerne.



Figur 7.4: Temperaturudvikling i centrum af luftstrålerne for vinduesudluftningsscenarier med tagvinduer ved analytisk og numerisk beregning.

Samme konklusioner omkring polafstand og K_a -værdi kan drages for hastigheds- og temperaturudvikling for luftstråler fra tagvinduerne som for facadevinduerne. Der er i strømningsligningerne ikke taget hensyn til strålens fiktive udbredelsespunkt, hvilket kan have betydning for længden af den konstante hastighedskerne. Derudover kan der være forskel på bevæggrunden for valg af K_a -værdi i beregning med strømningsligningerne og den måde, som indblæsningen er opbygget på i CFD-modellen.

7.2 Luftstrålernes hastigheds- og temperaturniveau i forhold til komfortkrav

Resultaterne af hastighedsniveauet i luftstrålerne ved indtrædelse i køkken-alrummets opholdszone er vist i tabel 7.1 på den følgende side. Derudover angiver tabellen også den maksimalt tilladte hastighed i luftstrålen ved det specifikke temperaturniveau i strålen i forhold til trækrisikoen. Det ses, at beregningerne ud fra strømningsligninger medfører acceptable lufthastigheder i luftstrålerne i forhold til trækrisiko, hvorimod den numeriske beregning af luftstrålerne medfører hastigheder, som for de fleste scenarier er langt over kravet til træk. Dette bevirker også en stor afvigelse mellem resultaterne ved de to beregningsmetoder i størrelsesordenen 15,79-55,26%.

	Strømningsli	gninger	CFD		
Scenarie	Hastighedskrav	Hastighed	Hastighedskrav	Hastighed	Afvigelse
	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[%]
1	0,20	0,15	0,15	0,19	15,79
2	0,21	0,17	0,21	0,25	32,00
3	0,20	0,16	0,17	0,38	55,26
4	0,23	0,15	0,20	0,23	34,78
5	0,21	0,17	0,18	0,26	34,62
6	0,23	0,21	0,18	0,26	19,23
7	0,17	0,16	0,15	0,23	30,43
8	0,21	0,14	0,19	0,30	50,00
9	0,20	0,16	0,17	0,32	46,88
10	0,25	0,18	0,21	0,22	18,18

Tabel 7.1: Sammenligning af hastighedsniveauet i luftstrålerne ved opholdszonen ud fra analytisk og numerisk beregning.

Resultaterne af temperaturniveauet i luftstrålerne ved indtrædelse i køkken-alrummets opholdszone er vist i tabel 7.2. Derudover angiver tabellen også kravet til temperaturniveauet i opholdszonen, som er bestemt ud fra komfortgrænserne ved *Running mean* metoden. Tabellen viser acceptable temperaturer i luftstrålerne ved opholdszonen ved strømningsligninger og numerisk beregning. Det eneste scenarie, hvis luftstråletemperatur ikke er acceptabelt i forhold til temperaturkravet, er *Scenarie 1* og 7 ved numerisk beregning. Temperaturniveauet er generelt højere for strømningsligningerne. Sammenlignet med afvigelsen i hastighedsniveauet for strømningsligningerne og CFD-beregning, er afvigelsen i lufttemperaturniveauet mellem de to beregningsmetoder mere acceptabelt, da den er i intervallet 3,81-21,64%.

	Strømningsligninger		CFD)	
Scenarie	Temperaturkrav	Temperatur	Temperaturkrav	Temperatur	Afvigelse
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]
1	20,00	22,99	20,00	18,90	21,64
2	20,00	23,98	20,00	23,10	3,81
3	21,00	23,56	21,00	21,10	11,66
4	20,00	25,32	20,00	23,40	8,21
5	20,00	23,92	20,00	21,33	12,14
6	20,00	25,07	20,00	21,60	16,06
7	20,00	20,92	20,00	18,50	13,08
8	20,00	24,19	20,00	23,00	5,17
9	20,00	23,30	20,00	20,80	12,02
10	20,00	26,24	20,00	24,30	7,98

Tabel 7.2: Sammenligning af temperaturniveauet i luftstrålerne ved opholdszonen ud fra analytisk og numerisk beregning, samt komfortkravet til temperaturniveauet ud fra *Running mean* metoden.

Resultaterne af hastigheds- og temperaturniveauet i de 10 vinduesudluftningsscenarier viser stor afvigelse mellem beregningsmetoden for de analytiske strømningsligninger og den numeriske beregningsmetode. Generelt underestimeres hastighedsniveauet og temperaturniveauet overestime-
res ved strømningsligningerne.

Der er flere grunde til afvigelsen i hastigheds- og og temperaturniveauet i luftstrålerne ved analytiske strømningsligninger og numerisk beregning. Sammenlignet med CFD-beregninger af lufthastighedsforholdene, er de analytiske strømningsligninger ikke påvirket af ændringer i nedstrømsbetingelser, som kan forekomme ved ændringer i den omkringliggende geometri. Det eneste hensyn, der tages til den rumlige geometri, er ved bestemmelse af, om luftstrålerne er fri- eller vægstråler og ved fastsættelse af faktoren K_{sa}, som fastsættes ud fra fordelingen af varmekilder i rummet. Dette bevirker, at hastigheds- og temperaturniveauet i de analytiske strømningsligninger ikke er påvirket af en eventuel fysisk modstand i rummet.

Endvidere kan en del af forklaringen på afvigelsen mellem strømningsligningerne og numerisk beregning af luftstrømningsforholdene findes i måden, hvorpå de to beregningsmetoder anvender deres begyndelses- og randbetingelser. Ved strømningsligningerne anvendes et givet hastigheds- og temperaturniveau i vinduesåbningen, hvorimod den numeriske beregningsmetode anvender randbetingelser for vinduesåbningen samt afgrænsende flader og interne varmebelastninger i rummet, som vil påvirke luftstrålernes bane, hastighed, temperatur og udbredelse.

I CFD-modellen tages hensyn til den termiske opdrift og dennes påvirkning på hastigheds- og temperaturniveau i luftstrømningerne. I CFD-beregningerne for tagvinduerne stiger hastigheden i *Scenarie 5*, *7*, *8* og *9* undervejs i luftstrålens længderetning. Dette kan skyldes tyngdekraftens påvirkning på luftstrømningen, da indblæsningsluften har højere densitet pga. et lavere temperaturniveau end rumluften. Denne påvirkning fra den termiske opdrift medtages ikke i beregning af hastighedsudvikling med strømningsligningerne. Påvirkningen medtages dog i beregning af luftstrålens bane. Hastighedsstigningen kan endvidere skyldes en kontraktion af tværsnittet i luftstrålerne idet de rammer bagvæggen i CFD-modellen.

Desuden kan der som tidligere nævnt være yderligere forskelle i beregning af luftstrømningernes hastighedsudvikling grundet forskelle i antagelserne for luftstrålernes udbredelse ved strømningsligningerne og udbredelsen i CFD-beregningerne. Desuden stemmer den valgte K_a-værdi i strømningsligningerne ikke overens med indblæsningsformen i CFD-modellen.

7.3 Luftstrålernes kølingspotentiale

I dette afsnit undersøges luftstrålernes kølingspotentiale i køkken-alrummet ved numerisk beregning af lufttemperaturniveauet og BSim-beregninger.

Eftersom BSim antager at luften i den termiske zone for køkken-alrummet er fuldstændig opblandet, beregnes for BSim-modellen et temperaturniveau for hele køkken-alrummet for hvert vinduesudluftningsscenarie. I de 10 CFD-modeller af scenarierne er der indsat to søjler med testpunkter til beregning af køkken-alrummets temperaturniveau og eventuelt temperaturgradient, som vist på figur 7.5 på den følgende side. En mere præcis angivelse af testpunkternes placering til beregning af temperaturgradienten i rummet er vist på figur M.6 på side 197 i bilag M på side 193.



Figur 7.5: 3D-visualisering af CFD-modellen af køkken-alrummet med placeringen af to temperaturgradienter.

Figur 7.6 og figur 7.7 på næste side viser resultater af CFD-simuleringerne for temperaturniveauet i køkken-alrummet for de 10 scenarier. Generelt er der stor forskel på temperaturniveauet i køkken-alrummet for de 10 scenarier. For eksempel er temperaturniveauet i testpunkterne for *scenarie 1* i intervallet 18,5-19,5°C, hvorimod temperaturniveauet i testpunkterne for *scenarie 10* er i intervallet 26,5-27,5°C. Den markante forskel i temperaturniveauet skyldes scenariernes randbetingelser, samt den anvendte ventilationsstrategi ved enten aktive facade- eller tagvinduer. Randbetingelsernes indvirken på temperaturniveauet i køkken-alrummets opholdszone illustreres tydeligt ved *scenarie 1*, som har en indblæsningshastighed og -temperatur på henholdsvis 0,79 m/s og 11,8°C, og *scenarie 10* som anvender indblæsningshastighed og -temperatur på henholdsvis 1,17 m/s og 17,6°C.

Derudover viser figur 7.6 og figur 7.7 på modstående side at temperaturniveauet er mere konstant i opholdszonen for scenarierne, med undtagelse af scenarie *scenarie 10*. Derimod er temperaturgradienten mere markant over opholdszonen sammenlignet med temperaturgradienten i opholdszonen. Denne tendens er et udtryk for ringere opblanding mellem luftstrålerne og eksisterende rumluft over rummets opholdszone sammenlignet med luften i opholdszonen. Samtidig viser figurene en mindre temperaturgradient i rummet for *scenarie 2, scenarie 5* og *scenarie 6*, som anvender ventilationsstrategien med aktive facadevinduer. Temperaturgradienten i netop disse scenarier kan være et udtryk for ringe opblanding mellem luftstrålerne fra facadevinduerne og eksisterende rumluft, hvilket også underbygges af figur 6.17 på side 88.



Figur 7.6: Temperaturgradient 1 for 10 vinduesudluftningsscenarier.



Figur 7.7: Temperaturgradient 2 for 10 vinduesudluftningsscenarier.

Tabel 7.3 på den følgende side viser CFD-simuleringer og BSim-beregninger af gennemsnitstemperaturen i køkken-alrummet. For CFD-simuleringerne er gennemsnitstemperaturen i køkkenalrummet beregnet som gennemsnitstemperaturen i testpunkterne for temperaturgradienterne 1 og 2. Det ses at gennemsnitstemperaturen i rummet ved CFD-beregning er meget ens for testpunkterne i de to temperaturgradienter, hvilket indikerer at der ikke opstår et asymmetrisk temperaturfelt i rummet.

	CFD		BSim
Scenarie	Temperaturgradient 1	Temperaturgradient 2	Temperatur
	[°C]	[°C]	[°C]
1	18,80	18,95	25,80
2	23,23	23,41	25,54
3	22,31	22,40	26,60
4	24,27	24,17	26,66
5	23,03	22,97	25,59
6	21,89	21,87	26,59
7	19,39	19,49	23,92
8	23,82	23,83	26,63
9	21,03	20,75	26,42
10	26,86	26,77	27,76

Tabel 7.3: Gennemsnitstemperaturer i køkken-alrummet ved CFD-beregning og BSim-beregning af lufttemperaturen for 10 vinduesudluftningsscenarier.

Tabel 7.3 angiver også en markant forskel i temperaturniveauet i køkken-alrummet ved CFDberegning sammenlignet BSim-modellen. Eftersom CFD-beregningerne er udført for samme scenarier med anvendelse af randbetingelser i BSim-modellen er det enten CFD-beregningerne som overestimerer kølingseffekten i rummet eller BSim-modellen som underestimerer kølingseffekten ved vinduesudluftning. Dette kan også skyldes måden, hvorpå de to beregningsmetoder medtager den konvektive varmeafgivelse fra interne varmekilder. I BSim bliver den konvektive varmeafgivelse fra personer og udstyr fordelt jævnt i den pågældende termiske zone og temperaturniveauet i den termisk zone evalueres ud fra et punkt, hvorimod den konvektive varmeafgivelse i CFDberegningerne er koncentreret omkring det fysiske element som afgiver varmen.

DISKUSSION

I dette kapitel foretages en generel diskussion af de i rapporten præsenterede resultater om analytiske strømningsligninger og numeriske beregninger af luftstrømningsforhold i køkkenalrummet ved vinduesudluftning. Diskussionen er en anskueliggørelse og vurdering af anvendte antagelser og beregningsmetoder af luftstrømningsforholdene i køkken-alrummet. Undervejs i kapitlet foretages perspektiveringer, hvor der præsenteres en række anbefalinger til fremtidige analyser af luftstrømningsforhold i naturligt ventileret boliger.

Formålet med projektet var at anvende og vurdere forskellige metoder til beregning af luftstrømningsforhold i køkken-alrummet af BFL med henblik på at sænke temperaturniveauet uden at skabe træk. Hertil opstilte projektgruppen en termisk simuleringsmodel i BSim til dynamisk beregning af kølebehovet for alle timer af måleperioden. Simuleringsmodellen blev kalibreret med det formål, at den skulle kunne simulere de målte indetemperaturforhold i køkken-alrummet med acceptabel præcision i perioder med høje indetemperaturer. Derfor var det ikke hovedformålet at lave modellen så realistisk som muligt og nogle ændringer, såsom styringsstrategien for solafskærmningen i 5. kalibrering, blev ikke lavet ud fra analyse af, hvordan solafskærmningen reelt havde fungeret i perioden. Ligeledes blev der i 4. kalibrering varieret infiltrationsmængder uden at kende til resultat af for eksempel trykprøvninger og tætheden af BFL i virkeligheden. Ved sammenligning af slutsimuleringsmodellen og målinger blev det dog vurderet, at modellen på de ønskede parametre havde en acceptabel korrelation mellem det simulerede og målte lufttemperaturniveau i køkken-alrummet.

Simuleringsresultaterne i BSim enkelt-zone slutmodellen viste, at det var nødvendigt at anvende køling ved naturlig ventilation i 3066 timer af måleperioden for at overholde det ønskede temperaturniveau i køkken-alrummet. Derfor udvalgte projektgruppen typiske situationer med kølebehov for at reducere beregningsbyrden. Der kunne ikke findes nogen umiddelbar korrelation mellem de tre undersøgte parametre; luftmængdebehov, udetemperatur og drivtryk i timer med kølebehov. Derfor blev de typiske situationer med kølebehov ved naturlig ventilation valgt ud fra 25%, 50% og 75%-fraktiler af karakteritiske parametre i timer med kølebehov. Fraktilerne blev vurderet som værende repræsentative for størstedelen af situationerne med kølebehov angivet ved luftmængdebehovet, udetemperaturen og det tilladelige drivtryk. Til løsning af denne problemstilling, kunne yderligere statistiske vurderinger og korrelationsundersøgelser mellem parametrene, have givet større vished om de valgte typiske vinduesudluftningsscenarier var repræsentative for den givne datamængde.

For de typiske situationer var målet at anvende og validere forskellige vinduesudluftningsscenarier til at sænke temperaturniveauet i køkken-alrummet uden risiko for træk. Undersøgelsen inkluderede både simple, analytiske strømningsligninger og detaljeret, numerisk beregning. Hertil foretog projektgruppen en række antagelser vedrørende geometrien af køkken-alrummet og beregningsmetoderne af strømningsligninger, for dernæst at opstille nogle begrænsninger for variationsmuligheder i de typiske situationer. Overordnede afgrænsninger var, at der kun blev opstillet massebalance for vinduesåbningskombinationer i BFL med to vinduer, hvorved der kun kunne opstå luftindstrømning til køkken-alrummet gennem facade- eller tagvinduerne. Samtidig ville der i beregningen af luftstrømningens randbetingelser anvendes den åbningskombination for hvert scenarie, som gav den største trykforskel. Afgrænsningen i forhold til rummets massebalance blev primært foretaget af hensyn til at reducere datamængden ved forskellige kombinationsmuligheder af vinduesåbninger, og dermed kunne validere de typiske vinduesudluftningsscenarier ved analytiske strømningsligninger og numerisk beregning af luftstrømningsforhold. Derfor kunne det have været interessant at undersøge luftstrømningssituationer med flere åbningsplaceringer, for at undersøge de analytiske strømningsligninger ved interaktion mellem flere luftstråler i rummet. Denne undersøgelse ville måske have gjort det for upræcist at anvende strømningsligningerne, da anvendelsen af luftstrømningsligninger forudsætter at luftstrålerne i rummet er uafhængige af andre luftstrømme i rummet.

Afgrænsning i form af indstrømning igennem køkken-alrummets facade eller tag blev gjort, da det ønskedes at anvende strømningsligninger til at beskrive luftstrålernes hastigheds- og temperaturniveu fra vinduesåbningerne og videre ind i rummet. Desuden var formålet med projektet at undersøge køkken-alrummet, og den naturlige ventilations påvirkning på lokal termisk komfort, og ikke påvirkningen af naturlig ventilation for hele BFL.

Afgrænsning mht. at anvende den største trykforskel mellem to åbninger i hvert scenarie blev primært gjort af hensyn til at reducere antallet af åbningskombinationer. Derudover blev det antaget, at høje indblæsningshastigheder og små åbningsarealer kunne give lange indtrængningsog kastelængder hvilket ville resultere i optimal opblanding af rumluften, så der ikke var risiko for, at kold udeluft ville indtræde opholdszonen. Det kunne have været interessant at teste hypotesen om, at det var mest hensigtsmæssigt at anvende den største trykforskel, ved at øge antallet af beregninger. Hypotesen er dog indirekte testet ved at sammenligne beregnede luftstrømninger ved ensidet og tvær- og opdriftsventilation. Ensidet ventilation har nemlig et mindre drivtryk end tvær- og opdriftsventilation, og i sammenligningen i kapitel 5 på side 51 viste beregninger af strømningsligninger at der ville opstå større risiko for træk ved ensidet ventilation.

Til anskueliggørelsen af lufthastigheds- og lufttemperaturfeltet i køkken-alrummets opholdszone anvendte projektgruppen forskellige analytiske strømningsligninger, og CFD-programmet Flo-VENT til analysen af numeriske luftstrømningsforhold. Ved anvendelse af de analytiske strømningsligninger findes en række begrænsninger i forhold til luftstrålernes nedstrømsbetingelser, som bevirker at beregningsmetoden bag strømningsligningerne kan blive upræcis, hvis der optræder flere dominerende luftstrømme i et rum som også har en kompliceret rumgeometri. Det er dog forsøgt at anvende strømningsligningerne så præcist som muligt for et naturligt ventileret rum, hvor der opstår flere dominerende luftstrømme.

Ved korrekt anvendelse af strømningsligningerne er det nødvendigt at have kendskab til karakteristika ved det pågældene indblæsningsarmatur, hvilket i dette projekt var facadeog tagvinduerne i køkken-alrummet. Disse karakteristika dækker over fordelingen af interne varmekilder, rummets geometri, og luftstrålernes strømningsfelt igennem vinduesåbningerne og dernæst udbredelsen i rummet. Eftersom det kræver målinger på det pågældende vindue og standardiseret rumgeometri at fastlægge disse konstanter, blev der valgt middelværdier ud fra tilgængelig litteratur. I denne forbindelse kunne det have været interessant at foretage en parametervariation eller følsomhedsanalyse, for at belyse betydningen af parametrene, ved at variere dem indenfor realistiske intervaller. Derudover kunne anvendelse af CFD-simuleringer have fungeret som et kalibreringsværktøj af konstanterne i strømningsligningerne for at forbedre præcisionen af disse. Eksempelvis viste resultaterne af CFD-simuleringerne, at der aldrig opstod sammensmeltning af flere dominerende luftstråler ved anvendelse af enten ventilationsstrategi 1 med facadevinduerne eller ved ventilationsstrategi 2 med tagvinduerne.

Derudover kunne det være interessant at undersøge det praktiske aspekt ved beregningen af luftstrålerne fra vinduesåbningerne. Beregningerne af effektive åbningsarealer for vinduesåbningerne skete uden hensyntagen til det realistiske styringsmodul af vinduesåbningerne. Der er derfor antaget en kontinuerlig åbningsgrad, hvilket ikke er tilfældet for virkelige, mekanisk-styrede vinduer. Dette kan have en betydelig indvirken, eftersom der anvendes meget små åbningsgrader i beregninger, hvor en afvigelse i åbningsgraden kan have relativt stor indflydelse på temperatur- og hastighedsniveauet. En parametervariation eller følsomhedsanalyse af indblæsningsparametrene for åbningsarealet og indblæsningshastigheden kunne have afdækket, hvilke konsekvenser en diskret styring af åbningsgraden kunne have haft på komfortniveauet i køkken-alrummet.

I CFD-beregningerne blev der opstillet en beregningsmodel, som inkluderede køkken-alrummets geometri med et par geometriske simplificeringer. Der blev blandt andet ikke taget hensyn til en trappe, der går fra stueetage til 1.sal langs den vestlige væg af køkken-alrummet. Ligeledes blev den ene ende af køkken-alrummet, som indeholder selve køkkeninventaret, ikke inkluderet i den geometriske opbygning af CFD-simuleringsmodellerne. I stedet blev der i CFD-modellerne implementeret en fiktiv bagvæg, hvilket har indvirkning på luftfordelingen i rummet. Dette faktum var tydeligt i scenarierne som anvender tagvinduerne til luftindstrømning. Her påvirkes hastigheden i luftstrålen idet den rammer bagvæggen, eftersom luftstrålens tværsnit reduceres. Herved opnår strålen en acceleration mod opholdszonen, som ikke ville forekomme i det virkelige køkken-alrum. Derudover blev den virkelige vinduesgeometri ikke implementeret i CFD-modellerne. Dette skyldes dels begrænsninger i måden, hvorpå indstrømmende luft kan defineres i FloVENT, og dels at det ville have krævet et meget detaljeret beregningsnet til at simulere udeluftens vej igennem vinduesåbningen. Dette ville have givet en simuleringsmodel med meget lange simuleringstider og desuden påvirket detaljeringsgraden af beregningsnettet for køkken-alrummet, som er altafgørende for at opnå valide CFD-simuleringsresultater.

KONKLUSION

Rapporten tager udgangspunkt i Bolig for livet, som er en bolig opført efter aktivhus-konceptet med fokus på elementer såsom indeklima, energi og miljø. Ved hensyntagen til en af elementerne er man ofte nødt til at gå på kompromis med en af de andre elementer, hvormed udfordringen består i at skabe den rigtige synergi mellem boligens indeklima-, energi- og miljøforhold. Formålet med rapporten har været beregning af luftstrømninger i BFL's køkken-alrum i typiske situationer med kølebehov, og dernæst evaluere luftstrømningernes indvirkning på lufthastighedsog lufttemperaturniveauet i opholdszonen, samt det generelle komfortniveau i rummet. Ved vinduesudluftning anvendes udeluften til køling af boligen hvormed der tages hensyn til boligens energi- og miljøperspektiv. Derimod er det svært at opnå luftstrømninger i køkken-alrummet, som ikke skaber trækrisiko, eftersom beregningerne viste situationer med kølebehov ved lave udetemperaturer og høje vindhastigheder.

Derfor blev inde- og udeklimamålinger ved BFL analyseret for at opnå overblik over, hvordan indeklimaet har været sammenholdt med udeklimaet. Målingerne af udeforholdene viste milde vindforhold og generelt højere udetemperaturen sammenlignet med DRY vejrdata. Ved evaluering af indeklimaet ud fra konceptet til adaptiv komfort viste beregningerne at der opstod problemer med for høje temperaturer både vinter, forår og efterår, mens der i sommerperioden generelt har været tilpas indetemperaturer. Dette skyldes blandt andet, at der i høj grad har været anvendt naturlig ventilation i form af vinduesudluftning i sommerperioden, mens der i den resterende del af året har været anvendt mekanisk ventilation og automatisk solafskærmning, som værn mod for høje indetemperaturer. Ud fra målingerne af inde- og udeklimaet blev der opstillet termiske simuleringsmodeller af BFL og køkken-alrummet i BSim, som kunne simulere indetemperaturniveauet i køkken-alrummet med acceptabel afvigelse fra målingerne. Derefter blev kølebehovet defineret ved at tillade naturlig ventilation i alle årets timer i forhold til *Running mean* komfortgrænse.

For at opnå komfort blev der anvendt naturlig ventilation i 3066 timer af året uden hensyntagen til trækrisikoen i køkken-alrummets opholdzone. Derfor blev indetemperaturniveauet i køkken-alrummet, i pågældende timer, analyseret ud fra tre følgende parametre: rummets kølebehov, udetemperaturniveauet og det tilladelige naturlige drivtryk. Ved anvendelse af 25, 50 og 75%-fraktiler for de tre parametre fandt projektgruppen 10 typiske vinduesudluftningsscenarier, som dannede baggrund for den videre analyse af luftstrømningsforholdene i køkken-alrummet.

For de 10 vinduesudluftningsscenarier blev der anvendt to metoder til analyse af luftstrømningerne og deres påvirkning på komfortniveauet i opholdszonen: analytiske strømningsligninger og numerisk CFD-beregning. Der er stor forskel på tidsforbrug, præcision og detaljeringsgrad mellem de to metoder og formålet med at sammenligne de to metoder var at belyse forskelle i beregningsresultaterne. De analytiske strømningsligninger er simple ligninger til beregning af lufthastigheds- og lufttemperaturniveauet i en luftstråles centerlinje uden hensyntagen til nedstrømsbetingelser, mens numerisk CFD-beregning involverede beregning af blandt andet lufthastigheder og lufttemperaturer i 729.000 beregningspunkter i køkken-alrummet. Da CFD-

beregningen var med meget stor detaljeringsgrad blev der indledningsvis lavet validering af både FloVENT, som blev brugt til CFD-beregningen, i form af en Benchmark test, og validering af opsætningen af CFD-modellen ud fra en netpunktsanalyse.

Resultaterne af de to beregningsmetoder viste, at strømningsligningerne, med de givne antagelser om luftstrømningstype og konstanter, undervurderer trækrisikoen i opholdszonen. For alle 10 vinduesudluftningsscenarier viste analysen af strømningsligningerne lavere hastigheder og højere temperaturer ved grænsen af opholdszonen. Dette skyldes både begrænsninger i anvendelsen af strømningsligningerne og den rumlige geometri i køkken-alrummet. CFD-beregningerne viste blandt andet, at antagelser om, at der kunne opstå plane luftstråler fra facadevinduerne var forkert, samt at der er stor risiko for høje lufthastigheder i opholdszonen ved anvendelse af tagvinduerne til indstrømning sammenlignet med brugen af facadevinduerne til indstrømning.

Beregninger med strømningsligninger for de 10 scenarier viste, at der ikke ville opstå træk i opholdszonen, mens CFD-beregningerne viste for høje hastigheder og dermed stor risiko for træk i lokale områder af opholdszonen. Dette er dog i de fleste scenarier kun i mindre områder af opholdszonen. CFD-simuleringerne af hastigheds-, temperatur og strømningsforholdene vurderes som mest troværdige i forhold til strømningsligninger, grundet valideringen af CFD-modellen og dens høje detaljeringsniveau. Derfor kan der i de typiske situationer ikke anvendes naturlig ventilation ved vinduesudluftning uden risiko for træk i opholdszonen. Der er dog nogle simplificeringer bag mulighederne i de valgte scenarier, som bevirker at andre strømningsforhold muligvis kunne have tilført den nødvendige luftmængde uden trækrisiko. Simplificeringerne omfatter blandt andet ventilationsstrategien, hvor der kun blev anvendt én åbningsplacering til indstrømning i køkken-alrummet for hvert vinduesudluftningsscenarie, samt at indstrømningen skulle foregå igennem vinduesåbningerne i køkken-alrummets facade- eller tagkonstruktion.

Litteratur

- Active House Alliance, 2014. Active House Alliance. Activehouse Network and knowledge sharing. URL: http://www.activehouse.info, 2014. Downloaded: 21-03-2014.
- Bolius, 2013. Bolius. *Generelt om indeklima*. URL: http://www.bolius.dk/generelt-om-indeklima-17406/, 2013. Downloaded: 02-05-2014.
- **BSim**, **2013**. BSim. *Building simulation program by the Danish Building Research Institute*, 2013.
- DS 474, 1993. DS 474. Norm for specifikation af termisk indeklima, 1993.
- DS/CEN/CR 1752, 2001. DS/CEN/CR 1752. Ventilation i bygninger Projekteringskriterier for indeklimaet, 2001.
- **DS/EN 15251**, 2007. DS/EN 15251. Input-parametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik. ICS: 91.040.01, 1. udgave. Dansk Standard, 2007.
- DS/EN ISO 7730, 2006. DS/EN ISO 7730. Ergonomi inden for termisk miljø Analytisk bestemmelse og fortolkning af termisk komfort ved beregning af PMV- og PPD-indekser og lokale termiske komfortkriterier. ICS: 13.180, 2. udgave. Dansk Standard, 2006.
- DTU, 2011. DTU. Design reference year et nyt dansk referenceår, 2011.
- Esbensen Rådgivende Ingeniører A/S, 2012. Esbensen Rådgivende Ingeniører A/S. *Energi og indeklima i måleperioden 2010-2011*, 2012.
- Etheridge and Sandberg, 1996. David Etheridge and Mats Sandberg. *Building ventilation Theory and measurements*. ISBN: 0 471 96087 X. Wiley, 1996.
- **Foldbjerg, Worm, Asmussen, and Feifer**, **2011**. Peter Foldbjerg, Amdi Worm, Thorbjørn Asmussen, and Lone Feifer. *Strategies for controlling thermal comfort in a danish low energy building: system configuration and results from 2 years of measurements*, 2011.
- **Foldbjerg, Worm, Asmussen, and Feifer**, **2012**. Peter Foldbjerg, Amdi Worm, Thorbjørn Asmussen, and Lone Feifer. *STRATEGIES FOR CONTROLLING THERMAL COMFORT IN A DANISH LOW ENERGY BUILDING: SYSTEM CONFIGURATION AND RESULTS FROM* 2 YEARS OF MEASUREMENTS. AIVC, 2012.
- **Heiselberg**, **2013**. Per Heiselberg. *Design of Natural and Hybrid Ventilation*. ISSN: 1901-7286. Aalborg University, 2013.
- **Heiselberg**, **2006**. Per Heiselberg. *Modelling of Natural and Hybrid Ventilation*. ISSN: 1901-7286. Aalborg University, 2006.

- Heiselberg, 1995. Per Heiselberg. Flow element models, 1995.
- Heiselberg, Svidt, and Nielsen, 2001. Per Heiselberg, Kjeld Svidt, and Peter Vilhelm Nielsen. *Characteristics of airflow from open windows*, 2001.
- Hyldgård, Funch, and Steen-Thøde, 1997. Carl Erik Hyldgård, E.J. Funch, and M. Steen-Thøde. *Grundlæggende Klimateknik og Bygningsfysik*. ISSN: 1395-8232 U9714. Aalborg University, 1997.
- Indeklimaportalen.dk, 2013. Indeklimaportalen.dk. Indeklima temperatur og træk. URL: http://www.indeklimaportalen.dk/indeklima/temperatur_og_traek/, 2013. Downloaded: 12-03-2014.
- Mentor Graphics Corporation, 2012. Mentor Graphics Corporation. *FloVENT User Guide Software Version 9.3*. Mentor Graphics Corporation, 2012.
- Munson, Okiishi, Huebsch, and Rothmayer, 2013. Bruce R. Munson, Theodore H. Okiishi, Wade W. Huebsch, and Alric P. Rothmayer. *Fluid Mechanics Seventh Edition*. ISBN: 978-1-118-318676. Wiley Plus, 2013.
- Nielsen, Restivo, and Whitelaw, 1979. P. V. Nielsen, A. Restivo, and J. H. Whitelaw. Buoyancy-affected flows in ventilated rooms, Numerical Heat Transfer, vol. 2, pp. 115-127. Imperial College of Science and Technology, London, 1979.
- **Nielsen**, **1990**. Peter V. Nielsen. *Specification of a two-dimensional test case*. ISSN: 0902-7513 R9040. Department of building technology and structural engineering, 1990.
- Nielsen, Allard, Awbi, Davidson, and Schälin, 2007. Peter Vilhelm Nielsen, Francis Allard, Hazim B. Awbi, Lars Davidson, and Alois Schälin. *Computational Fluid Dynamics in Ventilation Design*. 2007.
- Nielsen, Müller, Kandzia, Kosonen, and Melikov, 2013. Peter Vilhelm Nielsen, Dirk Müller, Claudia Kandzia, Risto Kosonen, and Arsen Krikor Melikov. *Mixing ventilation: Guide on mixing air distribution design*. Rehva, 2013.
- SBi 130, 1983. SBi 130. Måling af termisk indeklima, 1983.
- SBi 202, 2002. SBi 202. Naturlig ventilation i erhvervsbygninger, 2002.
- SBi 213, 2011. SBi 213. Bygningers energibehov, 2011.
- Schwenke, 1974. Heiner Schwenke. Das Verhalten ebener horizontaler Zuluftstrahlen im begrenzten Raum. Dresden University of Technology, 1974.
- Scumpieru and Dobre, 2012. Alina Scumpieru and Andrei Ionut Dobre. *Air Distribution and Thermal Balance between Zones in Residential Buildings*. Master thesis project. Aalborg Universitet, 2012.
- Stampe, 2000. Ole B. Stampe. *Ventilationsteknik*. ISBN: 87-987995-0-9, 1. udgave. Danvak ApS, 2000.
- Statens Byggeforskningsinstitut, 2011. Statens Byggeforskningsinstitut. BSim Userguide -Implementation of Mzm, 2011.

- ØSTKRAFT Net A/S, 2014. ØSTKRAFT Net A/S. Oversigt over elapparater. URL: http://www.oestkraft.dk/energiraadgivning/aut-tarif.asp?page=Energir% E5dgivning, 2014. Downloaded: 08-04-2014.
- **VELUX Danmark**, **2014**. VELUX Danmark. *Bolig for livet*. URL: http://www.velux.dk/om_velux_gruppen/model_home_2020/bolig_for_livet, 2014. Downloaded: 01-03-2014.
- Versteeg and Malalasekera, 2007. H K Versteeg and W Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics 2nd Edition*. ISBN: 978-0-13-127498-3. Pearson Education Limited, 2007.

KOMFORTKRAV TIL BOLIG FOR LIVET

Det termiske og atmosfæriske indeklima i køkken-alrummet evalueres i henhold til komfortkravene i [DS/EN ISO 7730, 2006] og adaptive komfortkrav i [DS/EN 15251, 2007].

A.1 Termisk komfort for hele kroppen

Forventningsniveauerne til indeklimaet, når hele kroppen skal være i termisk komfort, er angivet i tabel A.1 [DS/EN 15251, 2007] og [DS/EN ISO 7730, 2006]. Tabellen angiver komfortkravene til lufttemperaturniveauet i køkken-alrummet ved et aktivitetsniveau på 1,2 met. Derudover anvendes en beklædningsvarmeisolans på henholdsvis 0,5 clo ved sommersituationen og en 1,0 clo for en vintersituation.

Indeklimakategori	Termisk komfort af hele kroppen	Sommer	Vinter
	[%]	[°C]	$[^{\circ}C]$
Ι	$PPD \le 6$	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0
II	$PPD \le 10$	$24,5\pm1,5$	$22{,}0\pm2{,}0$
III	$PPD \le 15$	$24{,}5\pm2{,}5$	$22{,}0\pm3{,}0$

Tabel A.1: Forventet procentdel utilfredse med det termiske indeklima for hele kroppen afhængigt af indeklimakategori [DS/EN 15251, 2007].

Ud fra tabel A.1 fastsættes komfortkravet til lufttemperaturniveauet i køkken-alrummets opholdszone ved indeklimakategori II. Derfor anvendes et lufttemperaturniveau på 23-26°C for en sommersituation og 20-24°C for en vintersituation. [DS/EN ISO 7730, 2006]

A.2 Adaptiv komfort

Kravene til adaptiv komfort anvendes normalt for boliger med naturlig ventilation uden brug af mekanisk køling, hvor brugerne har god mulighed for at tilpasse sig det aktuelle indeklima [DS/EN 15251, 2007]. Tilpasning til det aktuelle indeklima kan ske ved ændring af aktivitetsniveau og beklædningens varmeisolans. Figur A.1 på næste side angiver komfortgrænserne for *Running mean* metoden ved adaptiv komfort. Ligningerne som beskriver komfortgrænserne i *Running mean* metoden er angivet i [DS/EN 15251, 2007].



Figur A.1: Komfortgrænser ved Running mean metoden.

Beregningsmetoden bag Running mean metoden er udtrykt ved ligning .

$$\Theta_{rm} = (1 - \alpha) \cdot \Theta_{ed-1} + \alpha \cdot \Theta_{rm-1} \tag{A.1}$$

Hvor:

Θ_{rm}	Running mean udendørstemperatur for pågældende dag [°C]
α	Konstant i intervallet 0-1, men anbefales på 0,8 [-]
Θ_{ed-1}	Gennemsnitstemperatur for dagen før [°C]
Θ_{rm-1}	Running mean udendørstemperatur for dagen før [°C]

Ved anvendelse af Running Mean metoden accepteres en overskridelse af komfortkravene til indeklimakategorierne på 5%.

A.3 Lokal termisk komfort ved træk

Træk defineres som en uønsket, lokal konvektiv afkøling af personer. Forventningsniveauerne til indeklimaet, når kroppen skal være i lokal termisk komfort ved træk, er angivet i tabel A.2 [DS/EN ISO 7730, 2006]. Tabellen angiver komfortkravene til maksimale middellufthastigheder i køkken-alrmmet for en sommer og vintersituation. Det er vigtigt, at risikoen for træk reduceres mest muligt, da dette kan give anledning til lokal termisk diskomfort ligesom for høje eller lave indelufttemperaturer vil give anledning til termisk diskomfort af hele kroppen.

Indeklimakategori	Lokal termisk komfort ved træk	Sommer	Vinter
	[%]	[m/s]	[m/s]
Ι	$PD \le 10 \%$	0,12	0,10
II	${ m PD} \leq 20~\%$	0,19	0,16
III	$PD \leq 30 \%$	0,24	0,21

Tabel A.2: Procentdel utilfredse ved termisk diskomfort i form af træk afhængigt af indeklimakategori [DS/EN ISO 7730, 2006]. Kravet til maksimale middellufthastigheder i opholdszonen fastsættes ud fra ligning A.2 som også er vist i figur A.2. Ligning A.2 er valid når den lokale middellufthastighed, $V_p < 0.5$ m/s. Den lokale turbulensintensitet sættes til 40 %.

$$PD = (34 - T_p) \cdot (V_p - 0.05)^{0.62} \cdot (0.37 \cdot V_p \cdot Tu + 3.14)$$
(A.2)

Hvor:

PD | Diskomfort ved træk [%]

 T_p Lokal lufttemperatur [°C]

V_p Lokal middellufthastighed [m/s]

Tu Lokal turbulensintensitet [%]

Figur A.2 angiver kravene til maksimale middellufthastigheder som funktion af lufttemperaturen ved forskellige indeklimakategorier. Det ses at risikoen for træk, og dermed en højere konvektiv afkøling er personer, øges når temperaturniveauet i luftstrømningen reduceres og middellufthastigheden og turbulensintensiteten øges. Der undersøges vinduesudluftningsscenarier for vinter- og sommersituation hvor risikoen for træk ved de maksimale middellufthastigheder er reduceret mest muligt.



Figur A.2: Maksimale middellufthastigheder ved minimumssom funktion lufttemperatur ved forskellige indeklimakategorier.

Ud fra tabel A.1 på side 115 og figur A.2 fastsættes lufthastighedsniveauet i køkkenalrummets opholdszone til 0,20 m/s ved minimumskomforttemperatur på 23°C og 0,16 m/s ved minimumskomforttemperatur på 20°C [DS/EN ISO 7730, 2006].

A.4 Komfortindeks

PMV-indekset anvendes til bestemmelse og fortolkning af det termiske komfortniveau for en stor gruppe af mennesker. PMV-indekset angiver den forventede middelbedømmelse (Predicted

Mean Vote), som er en funktion af personernes aktivitetsniveau, beklædningens varmeisolans og de fire indeklimaparametrer som er lufttemperaturen, middelstrålingstemperaturen, den relative luftfugtighed og luftens vanddamppartialtryk. For gruppen af mennesker angives den forventede middelbedømmelse af det termiske indeklima på en 7-trinsskala vist i tabel A.3. På 7-trinsskalaen angiver niveauet 0 optimal termisk neutralitet. Ved afvigelse af indeklimaet tilstand fra det optimale niveau er det muligt for varmereguleringsmekanismer i personernes kroppe at opnå varmebalance med omgivelserne, men ikk opnå komfort. Derfor vokser graden af termisk diskomfort for personerne, jo mere varmebalancen afviger fra komforttilstanden. [Hyldgård et al., 1997]

- 3	Koldt
- 2	Køligt
- 1	Let køligt
0	Neutralt
+ 1	Let varmt
+2	Varmt
+ 3	Hedt

Tabel A.3: Bestemmelse af termisk komfort ved 7-trinsskala [Hyldgård et al., 1997].

Den forventede middelbedømmelse angiver niveauet af termisk diskomfort for en stor gruppe personer, men udtrykker ikke direkte antallet af personer som er utilfredse med det termiske indeklima. Hertil anvendes PPD-indekset (Predicted Percentage Dissatisfied) som angiver den forventede procentdel utilfredse med det termiske indeklima. Der er en sammenhæng mellem PMV- og PPD-indekset som også er udtrykt i den analytiske beregning af PMV- og PPD, som er givet ved henholdsvis ligning **??** på side ?? og ligning A.4 på næste side [DS/EN ISO 7730, 2006].

Beregning af PMV-indeks:

$$\begin{split} PMV &= (0,303 \cdot exp^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot \left(M - W - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] \\ &-0,42 \cdot [M - W - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ &-3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \left[(t_{cl} + 273)^4 - (\overline{t_r} + 273)^4 \right] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{split}$$

Beregning af tøjets overfladetemperatur:

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot (A.3)$$
$$[(t_{cl} + 273)^4 - (\overline{t_r} + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)$$

Beregning af den konvektive varmeovergangskoefficient:

$$h_{c} = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_{a}|^{0,25} & \text{for} \quad 2,38 \cdot |t_{cl} - t_{a}|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{for} \quad 2,38 \cdot |t_{cl} - t_{a}|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

Beregning af arealforholdet mellem tøjets og kroppens overflade:

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00+1,290 \cdot I_{cl} & \text{for} \quad I_{cl} < 0,078m^2 \cdot K/W \\ 1,05+0,645 \cdot I_{cl} & \text{for} \quad I_{cl} < 0,078m^2 \cdot K/W \end{cases}$$

Beregning af PPD-indeks:

$$PPD = 100 - 95 \cdot exp^{-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2}$$

Hvor:

M | Aktivitetsniveau [W/m²]

- W Eksternt arbejde [W/m²]
- I_{cl} Tøjets varmebeklædningsisolans [m² · K/W]
- f_{cl} | Arealforholdet mellem tøjets og kroppens overflade [-]
- t_a Lufttemperatur [°C]
- $\overline{t_r}$ | Middelstrålingstemperatur [°C]
- *v_{ar}* | Lufthastighed [m/s]
- *p_a* | luftens vanddamppartialtryk [Pa]
- h_c Konvektive varmeovergangskoeeficient [W/m²·K]
- t_{cl} | Tøjets overfladetemperatur [°C]

A.5 Komfortkrav til luftkvaliteten

Forventningsniveauerne til indeklimaet med hensyn til atmosfærisk indeklima er angivet i tabel A.4. Forventningsniveauerne i køkken-alrummet evalueres ud fra en antaget baggrundskoncentration på 400 ppm. [DS/EN 15251, 2007]

Indeklimakategori	Atmosfærisk komfort
	[ppm]
Ι	<750
II	<900
III	<1200
IV	>1200

Tabel A.4: Forventningsniveauerne til CO₂-niveauet over udendørsniveau afhængigt af indeklimakategori [DS/EN 15251, 2007].

(A.4)

INPUTPARAMETRE TIL BSIM ENKELT-ZONE MODELLER

Dette bilag indeholder en beskrivelse af inputparametrene til BSim enkelt-zone modellerne af Bolig for livet. Først gennemgåes fælles inputparametre for start- og slutmodellen af BSim enkeltzone modellen. Dernæst vises inputparametre, som kun henvender sig til henholdsvis startmodellen eller slutmodellen. Fælles antagelser for startmodellen og slutmodellen er den geometriske opbygning af modellerne samt opbygningen af modellernes konstruktionselementerne. Forskellen mellem start- og slutmodellen findes i styringsstrategien for de anvendte systemer.

BSim enkelt-zone start- og slutmodellen består af én termisk zone, som er benævnt Z5_Køkkenalrum, hvor der simuleres indeklimaforhold. De resterende rum i BFL er benævnt Z1_Stuen, Teknikrum, Z3_Bad, Z4_Bryggers, Z6_Værelse-vest, Z7_Gæsteværelse, Z8_Bad og Z9_Værelseøst. Derudover indeholder enkelt-zone modellerne en garage, som er placeret mod BFL's nordfacade og et udhus, som er placeret mod BFL's østfacade.

B.1 Fælles antagelser for BSim enkelt-zone start- og slutmodellen

Følgende inputdata er fælles for både BSim enkelt-zone startmodellen og slutmodellen:

- Enkelt-zone model
- Rotation: 0°
- Vejrfil: vejrdata fra Lystrup ved Århus

B.1.1 Vejrdata til BSim-modellerne

I BSim-modellerne er der implementeret vejrdata målt på BFL's lokalitet i perioden 1. november 2010 til 31. oktober 2011. Vejrfilen indeholder følgende parametre:

- Atmosfærisk lufttryk [Pa]
- Skydække [-]
- Diffus solstråling på vandret [kW/m2]
- Lufttemperatur [°C]
- Absolut fugtindhold [kg/kg]
- Relativ luftfugtighed [%]
- Direkte solindstråling ved vinkelret indstråling [kW/m²]
- Himmeltemperatur [°C]
- Solens azimut [°]
- Solhøjde [°]
- Vindretning [°]
- Vindhastighed [m/s]

Alle inputdata til vejrfilen kan ses på bilags CD.

B.1.2 Geometri af BSim-modellernes zoner

Tabel B.1 viser en oversigt over størrelsen af de 9 zoner i BSim multi-zone modellen og enkeltzone modellerne.

Termisk zone	Brutto areal	Netto areal	Brutto volume	Netto volume
	[m ²]	[m ²]	[m ³]	[m ³]
Z1_Stuen	44,49	34,55	157,50	93,30
Teknikrum	9,10	4,78	22,63	6,59
Z3_Bad	5,76	4,41	20,39	11,89
Z4_Bryggers	9,99	6,77	35,36	18,28
Z5_Køkken-alrum	66,13	55,28	278,61	173,24
Z6_Værelse-vest	25,33	18,36	106,31	62,69
Z7_Gæsteværelse	13,72	11,65	61,09	41,86
Z8_Bad	13,21	12,38	59,64	44,10
Z9_Værelse-øst	18,46	15,05	77,14	49,00

Tabel B.1: Inputparametre for rumgeometrien af BSim multi-zone modellen og enkelt-zone modellerne.

B.1.3 Opbygning af BSim-modellernes konstruktioner

Tabel B.2 på modstående side viser en oversigt af konstruktionselementerne i BSim-modellerne.

Konstruktions type	Materiale	U-værdi	
	Gipsplade	0,098	
Vdaruma	Dampspærre		
Idelvæg	Isolering 42		
	Gipsplade		
	Gipsplade		
Indervæg	Isolering 36	0.342	
	Gipsplade		
	Betonlag		
Gulv	Isolering 36	0.062	
	Gipsplade		
Tag	Isolering 36	0.069	
Tag	Gipsplade		
	Lystransmitans: 0.7		
Vindue: Velfac Helo Max - S/V/Ø	U-værdi (centrum af glasset)	0,74	
	Solenergitransmitans: 0,6		
	Lystransmitans: 0.7		
Vindue: Velfac Helo SG - dør	U-værdi (centrum af glasset)	0,67	
	Solenergitransmitans: 0.37		
	Lystransmitans: 0.7		
Vindue: Velux.65 N/Tag	U-værdi (centrum af glasset)	0,5	
	Solenergitransmitans: 0.46		

Tabel B.2: Inputparametre til opbygning af konstruktionselementer i BSim-modellerne.

B.2 Styringsstrategi for BSim enkelt-zone startmodellen

Tabel B.3 på næste side og tabel B.4 på side 125 viser styringsstrategierne for henholdsvis klimatektiske installationer of vinduestyper i den termiske zone Z5_Køkken-alrum i BSim enkelt-zone startmodellen.

Z5_Køkken-alrum	Beskrivelse	Regulering	Tid
	4 personer, 2 met/pers	Hverdage:	Altid
	Heat gen.: 0,484 kW	75 % (06 - 07)	
Dansonan	CO ₂ gen.: 82,28 l/h	50 % (16 - 22)	
Personer		Weekender:	
		75 % (09 - 10)	
		50 % (16 - 22)	
	Heat gen: 3,293 kW	Hverdage:	Jan - Dec
	Part to air: 0,5	12 % (23 - 05)	Man - Fre
		20 % (06 - 07)	01 - 24
TT Jackson		12 % (08 - 15)	
Udstyr		22 % (16 - 22)	
		Weekender:	Jan - Dec
		12 % (24 - 08)	Lør - Søn
		20 % (09 - 23)	01 - 24
Infland: on	Air change: $0,2 h^{-1}$	100 % (01 - 24)	Altid
Initiation	Tmp power: 0,5		
	Max power: 35 W/m ²	HeatCoolCtrl:	Altid
Onvonning	Part to air: 0,5	Set point: 21°C	Man - Søn
Opvarmning		Design temp: -12°C	
		Te min: 17 °C	
	Task lighting: 0,05	LightCtrl:	Jan - Dec
Vunctio	Gen. lighting: 0,11 kW	Lower limit: 0,1 kW	Man - Søn
Kullsug	Gen. lighting: 200 lux	Temp max: 28°C	06 - 07
Derysning	Fluorescent		16-22
	Input: 0,02 m ³ /s	VAVCtrl:	15/10 - 01/05
	Total eff: 0,7	Min inlet temp: 21°C	Man - Søn
	Part to air 0,5	Max inlet temp: 21°C	01 - 24
	Output: $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$	Set point indoor air: 21°C	
Mekanisk	Total eff: 0,75	Set point cooling: 25°C	
ventilation	Part to air 0,5		
	Heat recovery: 0,75		
	Heating coil: 1 kW		
	Air source: Outdoor		
	Nat. Vent: Venting	VentingCtrl:	Uge 19-41
Naturlig	AirChange: 5 h ⁻¹	Set point Temp.: 23°C	Man - Søn
ventilation	Max Wind : 10 m/s	Set point CO ₂ : 850 ppm	10-20

Tabel B.3: Inputparametre for Z5_Køkken-alrum i BSim enkelt-zone startmodellen.

Vinduestyper	Beskrivelse	Regulering	Tid
	Manuel overstyring	SensorCtrl:	Altid
	Type: screen	Shade close: 9300 lux	
	Shading coefficient: 0,18	Shade open: 2400 lux	
Valfas Hala Mar S/V/0	Max sun: 150 W/m ²	SF4 Close: 0,05	
Sudfacada	Max wind: 10 m/s	SF4 open: 1	
Sydiacade	Refl: 0,5		
	Transm: 0,5		
	Position: external		
Velfac Helo SG - dør	Ingen solafskærmning		
	Ext.shading.velux.N	SensorCtrl:	Altid
	Type: screen	Shade close: 30000 lux	
	Shading coefficient: 0,07	Shade open: 10000 lux	
Value 65 N/Tag	Max sun: 150 W/m ²	SF4 Close: 0,05	
velux.05 IV/ lag	Max wind: 10 m/s	SF4 open: 1	
	Refl: 0,5		
	Transm: 0,5		
	Position: external		
	Manuel overstyring	SensorCtrl:	Uge 23-37
	Type: screen	Shade close: 10000 lux	
	Shading coefficient: 0,1	Shade open: 2000 lux	
Valtas Halo Max S/V/Ø	Max sun: 150 W/m ²	SF4 Close: 0,05	
Østfacada	Max wind: 10 m/s	SF4 open: 1	
DSudcaue	Refl: 0,5		
	Transm: 0,1		
	Position: external		

Tabel B.4: Inputparametre for vinduernes solafskærmning i BSim enkelt-zone startmodellen.

B.3 Styringsstrategi for BSim enkelt-zone slutmodellen

Tabel B.5 på næste side og tabel B.6 på side 127 styringsstrategier for henholdsvis klimatektiske installationer og vinduestyper i den termiske zone Z5_Køkken-alrum i BSim enkelt-zone slutmodellen.

Z5_Køkken-alrum	Beskrivelse	Regulering	Tid
	4 personer, 2 met/pers	Hverdage:	Jan - Dec
	Heat gen.: 0,484 kW	25 % (07 - 09)	Man - Fre
	CO ₂ gen.: 82,28 l/h	25 % (16 - 17)	01 - 24
		50 % (18 - 21)	
Darsonar		25 % (22)	
Personer		Weekend:	Jan - Dec
		25 % (09 - 10)	Lør - Søn
		25 % (16 - 17)	01 - 24
		50 % (18 - 21)	
		25 % (22)	
	Heat gen: 3,293 kW	Hverdage:	Jan - Dec
	Part to air: 0,5	12 % (23 - 06)	Man - Fre
		20 % (07 - 09)	01 - 24
Udatur		12 % (10 - 15)	
Oustyl		22 % (16 - 22)	
		Weekender:	Jan - Dec
		12 % (24 - 08)	Lør - Søn
		20 % (09 - 23)	01 - 24
Infiltration	Air change: $0,14 \text{ h}^{-1}$	100 % (01 - 24)	Altid
	Tmp power: 0,5		
	Max power: 35 W/m ²	HeatCoolCtrl:	Altid
Onvarmning	Part to air: 0,5	Set point: 21°C	Man - Søn
Opvarinning		Design temp: -12°C	
		Te min: 17°C	
	Task lighting: 0,05	LightCtrl:	Jan - Dec
Kunstig	Gen. lighting: 0,11 kW	Lower limit: 0,1 kW	Man - Søn
helvsning	Gen. lighting: 200 lux	Temp max: 28°C	06 - 07
	Fluorescent		16-22
	Input: 0,005 m ³ /s	VAVCtrl:	Uge 1-13, 15,
	Total eff: 0,7	VAV max factor: 4	18, 41-53
	Part to air 0,5	Min inlet temp: 21°C	Man - Søn
	Output: 0,005 m ³ /s	Max inlet temp: 21°C	01 - 24
Mekanisk	Total eff: 0,75	Set point indoor air: 21°C	
ventilation	Part to air 0,5	Set point cooling: 25°C	
	Heat recovery: 0,75		
	Heating coil: 1 kW		
	Air source: Outdoor		
	Nat. Vent: Disabled	VentingCtrl:	Uge 14, 16, 17,
	Basic AirChange: $0,5 h^{-1}$	Set point Temp.: 24°C	20-22,35-40
	TmpPower: 1	Set point CO ₂ : 850 ppm	Man - Søn
Naturlig	WindFactor: 0,4 s/m/h	Factor: 0,625	08 - 24
ventilation	Max AirChange: 4 h^{-1}	VentingCtrl sommer:	Uge 15, 19, 23-34
		Set point Temp.: 23°C	Man - Søn
		Set point CO ₂ : 850 ppm	01 - 24

Tabel B.5: Inputparametre for Z5_Køkken-alrum i BSim enkelt-zone slutmodellen.

Vinduestyper	Beskrivelse	Regulering	Tid
	Automatisk styring	SensorCtrl:	Jan - Dec
	Type: simple	Shade close: 1 lux	Man - Søn
	Shading coefficient: 0,18	Shade open: 0 lux	09, 18
	Max sun: 150 W/m ²	SF4 Close: 0,05	
	Max wind: 10 m/s	SF4 open: 1	
	Refl: 0,5	SensorCtrl:	Uge 11-23, 42-45
	Transm: 0,5	Shade close: 8000 lux	Man - Søn
	Position: external	Shade Open: 2500 lux	01 - 24
		SF4 Close: 0,05	
		SF4 open: 1	
Velfac Helo Max		SensorCtrl:	Uge 05-10, 24-41,
- S/V/Ø		Shade close: 20000 lux	46-49
Sydfacade		Shade open: 6000 lux	Man - Søn
		SF4 Close: 0,05	01 - 24
		SF4 open: 1	
		SensorCtrl:	Jan, Dec
		Shading coeff.: 0,25	Man - Søn
		Shade Close: 40000 lux	09, 18
		Shading Open: 10000	
		SF4 Close: 0,05	
		SF4 Open: 1	
Velfac Helo SG - dør	Ingen solafskærmning		
	Automatisk styring	SensorCtrl:	Uge 11-23, 42-45
	Type: screen	Shade close: 15000 lux	Man - Søn
	Shading coefficient: 0,07	Shade open: 5000 lux	01 - 24
	Max sun: 150 W/m ²	SF4 Close: 0,05	
	Max wind: 10 m/s	SF4 open: 1	
Velux.65 N/Tag	Refl: 0,5	SensorCtrl:	
	Transm: 0,5	Shade Close: 30000 lux	Uge 05-10, 24-41,
	Position: external	Shade Open: 6000 lux	46-49
		Sf4 Close: 0,05	Man - Søn
		Sf4 Open: 1	01 - 24
	Automatisk styring	SensorCtrl:	Jan - Dec
	Type: Screen	Shade close: 1 lux	Man - Søn
	Shading coefficient: 0,1	Shade open: 0 lux	09, 18
	Max sun: 150 W/m^2	SF4 Close: 0,05	
X7 10 XX 1 X 2	Max wind: 10 m/s	SF4 open: 1	
veltac Helo Max	Keff: 0,5	SensorCtrl:	Uge 12, 14-40,
- S/V/Ø	T 0.1	01 1' 00 0 00	10 15
O . (f 1	Transm: 0,1	Shading coeff.:0,08	42-45
Østfacade	Transm: 0,1 Position: external	Shading coeff.:0,08 Shade Close: 8000 lux	42-45 Man - Søn
Østfacade	Transm: 0,1 Position: external	Shading coeff.:0,08 Shade Close: 8000 lux Shade Open: 1000 lux	42-45 Man - Søn 01 - 24
Østfacade	Transm: 0,1 Position: external	Shading coeff.:0,08 Shade Close: 8000 lux Shade Open: 1000 lux Sf4 close: 0,05	42-45 Man - Søn 01 - 24

Tabel B.6: Inputparametre for vinduernes solafskærmning i BSim enkelt-zone slutmodellen.

TEORI OM LUFTSTRØMNINGER

C.1 Naturlig ventilation

Formålet med implementering af naturlig ventilation i køkken-alrummet er at opnå en acceptabel tilførelse af frisk luft til bygningens brugere i situationer hvor betingelserne for udeklimaet tillader det. Det tilsigtes at den naturlige ventilation, som skaber luftstrømningerne i rummet, udskifter den forurenede luft fra interne varme- og forureningskilder og selve bygningen med rent luft, for at sikre et sundt og komfortabelt indeklima i opholdszonen. Derudover anvendes luftstrømningerne til fordeling og udbredelse af luften i køkken-alrummet hvilket køler konstruktionen og inventaret for at opnå et komfortabelt lufttemperaturniveau i rummets opholdszone. [Heiselberg, 2013]

C.1.1 Drivkræfter for naturlig ventilation

Naturlig ventilation udnytter drivkræfterne ved termisk opdrift og vind eller ved en kombination. Drivkræfterne skaber en luftstrømning gennem vinduesåbningerne ind i bygningens rum, hvilket resulterer i en udskiftning af indeluften, en varmeoverførsel mellem bygningskonstruktion og inventar til indeluften og en varmeafgivelse fra mennesker til indeluften. Afhængigt af vindusåbningernes udformning og placering i bygningen, effekten af drivkræfterne og bygningsindretningen opstår den naturlige ventilation ved ensidet ventilation, tværventilation, opdriftsventilation eller en kombination. [Heiselberg, 2006]

Naturlig ventilation ved termisk opdrift

Naturlig ventilation ved termisk opdrift opstår ved en temperaturdifferens mellem udeluftens temperatur og indeluftens temperatur. Herved opstår densitetsforskelle mellem udeluften og indeluften der resulterer i en trykdifferens som skaber luftstrømningen gennem vinduesåbninger og interne zoner i bygningen. Når temperaturen for udeluften er lavere end temperaturen for indeluften opnås et indvendigt overtryk i den øverste del af bygningen og et indvendigt undertryk i den nederste del af bygningen. Neutralplanet angiver den højde hvor det udvendige tryk er lig det indvendige i tryk i bygningen. Undertryket under neutralplanets position bevirker at udeluften strømmer ind i bygningen gennem de lavere placerede vinduesåbninger [SBi 202, 2002]. Ligning C.1 angiver trykdifferensen for en vinduesåbning i en bestemt åbningshøjde ved termisk opdrift [Heiselberg, 2006].

$$\Delta p_t = \rho_i \cdot g \cdot \frac{T_i - T_u}{T_i} \cdot (H_o - H_1) \tag{C.1}$$

Hvor:

- Δp_t | Trykdifferens ved termisk opdrift [Pa]
- ρ_i | Indeluftens densitet [kg/m³]
- *g* Tyngdeacceleration [m/s²]
- *T_i* Absolutte indetemperatur [K]
- *T_u* Absolutte udetemperatur [K]
- H_o Neutralplanets højde [m]
- H_1 Åbningshøjde [m]

Naturlig ventilation ved vind

Naturlig ventilation på grund af vinden sker ved de forskellige tryk som vinden skaber på bygningens facade- og tagkonstruktion. Herved opstår trykdifferenser som får udeluften til at strømme ind gennem vinduesåbninger på bygningens vindside og indeluften til at strømme ud gennem vinduesåbninger på bygningens læside [SBi 202, 2002]. Ligning C.1 på forrige side beskriver trykdifferensen mellem bygningens vind- og læside [Heiselberg, 2006].

$$\Delta p_w = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_u \cdot v_{ref}^2 - P_i \tag{C.2}$$

Hvor:

$$\begin{array}{lll} \Delta p_w & \mbox{Trykdifferens ved vind [Pa]} \\ C_p & \mbox{Vindtrykkoefficient for abningen [-]} \\ \rho_u & \mbox{Udeluftens densitet [kg/m^3]} \\ v_{ref} & \mbox{Vindhastighed i referencehøjde [m/s]} \\ P_i & \mbox{Indeluftryk [Pa]} \end{array}$$

Indelufttrykket bestemmes ud fra ligning C.3, som gælder for en situation med to åbninger. I denne situation er indelufttrykket et gennemsnit af vindtrykkene på åbningerne.

$$P_{i} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{u} \cdot v_{ref}^{2} \cdot \frac{A_{1}^{2} \cdot C_{p1} + A_{2}^{2} \cdot C_{p2}}{A_{1}^{2} + A_{2}^{2}}$$
(C.3)

Hvor:

$$P_i$$
Indelufttryk [Pa] ρ_u Udeluftens densitet [kg/m³] v_{ref} Vindhastighed i referencehøjde [m/s] A_1 Areal af åbning 1 [m²] C_{p1} Vindtrykkoefficient for åbning 1 [-] A_2 Areal af åbning 2 [m²] C_{p2} Vindtrykkoefficient for åbning 2 [-]

Naturlig ventilation ved termisk opdrift og vind

Naturlig ventilation ved termisk opdrift og vind kan opstå individuelt, men optræder ofte som en kombination, hvor den termiske opdrift er dominerende ved små vindhastigheder mens vinden

er dominerende ved større vindhastigheder [SBi 202, 2002]. Ligning C.4 udtrykker den totale trykdifferens over en vinduesåbning ved termisk opdrift og vind [Heiselberg, 2006].

$$\Delta p_{total} = \Delta p_w + \Delta p_t = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho_u \cdot v_{ref}^2 - P_i + \frac{\rho_u \cdot \Delta T}{T_i} \cdot g \left(H_o - H_1 \right)$$
(C.4)

Hvor:

Δp_{total}	Total trykdifferens ved vinduesåbning [Pa]
Δp_w	Trykdifferens ved vind [Pa]
Δp_t	Trykdifferens ved termisk opdrift [Pa]
C_p	Vindtrykkoefficient [-]
$ ho_u$	Udeluftens densitet [kg/m ³]
<i>v_{ref}</i>	Vindhastighed i referencehøjde [m/s]
P_i	Trykket inde i bygningen [Pa]
$ ho_u$	Udeluftens densitet [kg/m ³]
ΔT	Absolutte temperaturdifferens mellem inde- og udetemperatur [K]
T_i	Absolutte indetemperatur [K]
H_o	Neutralplanets højde [m]
H_1	Åbningshøjde [m]

C.1.2 Volumenstrøm gennem vinduesåbninger

Volumenstrømmen gennem vinduesåbningen ved opdrifts- og tværventilation kan beskrives ud fra ligning C.5 [Heiselberg, 2006]. Ligningen udtrykker volumenstrømmen gennem en vinduesåbning hvor neutralplanet er placeret udenfor vinduesåbningerne.

$$q_{\nu} = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \tag{C.5}$$

Hvor:

- q_v | Volumenstrøm [m³/s]
- *C_d* Kontraktionskoefficient [-]
- *A* Vinduets geometriske åbningsareal [m²]
- Δp | Trykdifferens over vinduesåbning [Pa]
- ρ Densitet af luften [kg/m³]

Konstraktionskoefficienten C_d afhænger af kontraktionen og friktionstabet af luftstrømningen som passerer gennem vinduesåbningen. For skarpkantet vinduesåbninger, hvor friktionstabet er minimalt, er værdien for kontraktionskoefficienten i intervallet 0,6-0,7, mens værdien for afrundede strømningsåbninger ligger tæt på 1 [Heiselberg, 2013].

Ved ensidet ventilation, hvor neutralplanet er placeret midt i vinduesåbningen, opstår en strømning ind i rummet gennem den nederste del af vinduesåbningen og en strømning ud af rummet gennem den øverste del af vinduesåbningen, hvis indelufttemperaturen er højere end udelufttemperaturen. Volumenstrømmen ved ensidet ventilation er givet ved ligning C.6. [Heiselberg, 2006].

$$q = \frac{A}{2} \cdot \sqrt{0.001 \cdot v_{ref}^2 + 0.0035 \cdot h \cdot \Delta T + 0.001}$$
(C.6)

Hvor:

q Volumenstrøm [m³/s]

A Vinduets effektive åbningsareal [m²]

 v_{ref} | Vindhastighed i referencehøjde [m/s]

h Vinduets geometriske åbningshøjde [m]

 ΔT | Temperaturdifferens mellem inde og ude [K]

C.1.3 Effektivt åbningsareal

I alle beregninger, hvor vinduesåbningsareal indgår, er der benyttet beregning som vist i ligning C.7 [SBi 202, 2002].

$$\left(\frac{1}{A}\right)^2 = \left(\frac{1}{C_d \cdot A_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{C_d \cdot A_2 + 2 \cdot C_d \cdot A_3}\right)^2 \tag{C.7}$$

Hvor:

A Vinduets effektive åbningsareal [m²]

C_d | Kontraktionskoefficient [-]

 A_1 Delareal 1 [m²]

- A_2 Delareal 2 [m²]
- A_3 Delareal 3 [m²]

Delarealerne A, A₁, A₂ og A₃ er vist på figur C.1 på modstående side.



Figur C.1: Delarealers placering til beregning af det effektive areal for en vinduesåbning.

C.1.4 Analytiske strømningsligninger

De analytiske/empiriske strømningsligningerbeskriver hastigheds- og temperaturforhold i centrum af luftstrålerne. Strømningsligningerne beskriver et afgrænset luftvolumen, hvor luftbevægelserne er afhængige af et bestemt antal parametre for luftens bevægelse, hvilket er næsten uafhængigt af de gennerelle luftbevægelser i rummet. Afhængigt af ventilationsprincipperne for opblandings- og fortrængningsventilation anvendes effekten fra momentum og og termisk opdrift til at beskrive luftstrålens hastigheds- og temperaturforhold ud fra dens lokal- og opstrømsbetingelser. [Nielsen et al., 2013]

Designprincippet bag luftfordelingen i køkken-alrummet med strømningsligninger tager udgangspunkt i bestemmelsen af luftstrålens bane i rummet. Strømningsligningerne anvendes til analyse af luftstrålens udvikling i rummet ved dens lokale hastigheder og temperaturer. Luftstråletypen er karakteriseret ved geometrien af luftstrømningsarmaturet, som former en cirkulær eller plan luftstråle eller en kombination. Afhængigt af luftstrømningsarmaturets lokation i rummet i forhold til rummets overflader karakteriseres luftstrålen som en fri- eller vægstråle, illustreret ved figur C.2 på næste side. [Heiselberg, 1995]



Figur C.2: Principskitse af fristråle og vægstråle.

Luftstrømning gennem vindusåbningerne i køkken-alrummet danner en luftstråle, som på grund af medrivning fra rummets omgivende luft, oplever en hastighedsudvikling og en udvidelse, illustreret ved figur C.2. En cirkulær fristråle genereres ud fra en cirkulær eller et kvadratisk luftstrømningsarmatur, hvor luftstrålen i teorien, strømmer ind i et uendeligt rum, hvorimod luftstrålen for en cirkulær vægstråle strømmer parallet med en væg ind i et halvt uendeligt rum. En plan fristråle dannes fra en spalteåbning eller flere tætplacerede dyseåbninger. Her er luftstrålen uendelig i bredde og strømmer ind i et uendeligt rum, hvorimod luftstrålen for en plan vægstråle strømmer ind i et halvt uendeligt rum. [Nielsen et al., 2013]

C.1.5 Isotermisk luftstrømning

Isotermisk luftstrømning i et rum er karakteriseret ved at luftstrålens indblæsningstemperatur er lig rummets lufttemperatur. Derudover er luftstrålen ikke påvirket af nedstrømsbetingelser i rummet og kan dermed udtrykkes ved universale profiler, som afhængigt af en fri- eller vægstråle, antager et gaussik lufthastighedsprofil. Betingelserne gør det muligt at beskrive luftstrømningen uafhængigt af andre faktorer i rummet. Konceptet om momentumbevarelse, mellem luftstrålens startlokation til luftstrålens lokation i rummet, danner baggrund for de analytiske udtryk for cirkulære fri- og vægstråler og plane fri- og vægstråler [Nielsen et al., 2013]. Hastighedsudviklingen for en cirkulær fri- og vægstråle er givet ved ligning C.8 og ligning C.9, og får cirkulær og plan vægstråle er givet ved ligning C.10 på næste side og ligning C.11 på modstående side.

$$\frac{u_x}{u_0} = \frac{K_a}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{a_0}}{x + x_0} \qquad (C.8) \qquad \qquad \frac{u_x}{u_0} = K_a \cdot \frac{\sqrt{a_0}}{x + x_0} \qquad (C.9)$$

$$\frac{u_x}{u_0} = \frac{K_p}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{h_0}{x + x_0}} \quad (C.10) \qquad \qquad \frac{u_x}{u_0} = K_p \cdot \sqrt{\frac{h_0}{x + x_0}} \quad (C.11)$$

Hvor:

u_x	Maksimal lufthastighed i luftstrålens centerlinje i x-retning [m/s]
u_0	Indblæsningshastighed i x-retning [m/s]
K_a, K_p	Konstant for luftstrømningsarmatur [-]
a_0	Areal af indblæsningsåbning [m ²]
h_0	Højde af indblæsningsåbning [m]
x	løbende koordinat i x-retning [m]
x_0	Polafstand [m]

C.1.6 Ikke-isotermisk luftstrømning

Ikke-isotermisk luftstrømning i et rum er karakteriseret ved at luftstrålens indblæsningstemperatur er forskellig fra rummets udblæsningstemperatur, som ved tilfælde af fuld opblanding er udtrykt ved rummets lufttemperatur. Denne luftstrømningsform anvendes hvis rummet eller rummets opholdszone indeholder et ekstra varme- eller kølebehov.

Horisontale termiske luftstråler

Ved ikke-isotermisk strømning, hvor indblæsningstemperaturen er lavere end rumtemperaturen, vil en horisontal luftstråle antage et nedadrettet profil i vertikal retning på grund af tyngdekraften. Derimod vil en indblæsningstemperatur højere end rumtemperaturen få luftstrålen til at antage et opadrettet profil i vertikal retning på grund af termisk opdrift. Et andet vigtigt element der indvirker på luftstrålens bane er Coanda-effekten. På grund af det turbulente opblandingslag på begge sider af luftstrålen opstår en medrivning af luft fra omgivelserne, hvorved der skabes et undertryk over luftstrålen. Undertrykket får luftstrålen til at klæbe sig til loftet hvorefter den igen falder ned fra loftet i afstanden x_s fra indblæsningsarmaturet. En kort indtrængningslængde x_s for luftstrålen er sjældent ønskeligt, fordi luftstrålen kan have en høj lufthastighed og lav lufttemperatur ved indtrædelse i opholdszone, som dermed kan skabe termisk diskomfort for brugerne. Dette er vigtige elementer i de analytiske udtryk for luftstråler ved horisontal termisk strømning, som er bestemmende for luftstrålens hastigheds- og temperaturudvikling [Heiselberg, 1995]. Ligning C.12 beskriver luftstrålens bane i rummet for en termisk cirkulær fristråle.

$$y = \frac{0.02}{K_a} \cdot \frac{\Delta T_0 \cdot A_0}{u_0^2} \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{A_0}}\right)^3 \tag{C.12}$$

Hvor:

у	Løbende koordinat i y-retning [m]
Ka	Konstant for luftstrømningsarmatur [-]
ΔT_0	Temperaturdifferens mellem indblæsningstemperatur og lufttemperatur i rummet [°C]
A_0	Areal af indblæsningsåbning [m ²]
u_0	Indblæsningshastighed i x-retning [m/s]
x	løbende koordinat i x-retning [m]

Ligning C.13 udtrykker indtrængningslængden for en termisk cirkulær vægstråle.

$$x_s = K_{sa} \cdot K_a \cdot \sqrt{\frac{u_0^2 \cdot \sqrt{A_0}}{\Delta T_0}} \tag{C.13}$$

Hvor:

 x_s Indtrængningslængde i x-retning for cirkulær vægstråle [m]

K_{sa} Konstant som beskriver parametre udenfor luftstrålen [-]

*K*_a | Konstant for cirkulært luftstrømningsarmatur [-]

*u*₀ Indblæsningshastighed i x-retning [m/s]

 A_0 Areal af indblæsningsåbning [m²]

 ΔT_0 | Temperaturdifferens mellem indblæsningstemperatur og lufttemperatur i rummet [°C]

Tilsvarende benyttes nedenstående ligning C.14, hvis der er tale om en termisk plan vægstråle.

$$x_s = K_{sp} \cdot K_p^2 \cdot \left(\frac{u_0^2 \cdot \sqrt{h}}{\Delta T_0}\right)^{2/3} \tag{C.14}$$

Hvor:

x_s	Indtrængningslængde i x-retning for plan vægstråle [m]
K _{sp}	Konstant som beskriver parametre udenfor luftstrålen [-]
K_p	Konstant for plant luftstrømningsarmatur [-]
u_0	Indblæsningshastighed i x-retning [m/s]
h	Højde af indblæsningsspalte [m ²]
ΔT_0	Temperaturdifferens mellem indblæsningstemperatur og lufttemperatur i rummet [°C]

Vertikale termiske luftstråler

For vertikale termiske luftstråler afhænger lufthastighedsudviklingen i centerlinien af luftstrålen af om momentum og tyngdekraften virker i samme eller modsatte retning. Ved modsatrettet retning af momentum og tyngdekraften vil lufthastigheden falde hurtigt. Omvendt, hvis momentum og tyngdekraften i luftstrålen virker i samme retning vil hastigheden falde langsomt eller vokse [Heiselberg, 1995]. Ligning C.15 udtrykker hastighedsudviklingen i centerlinien for en vertikal cirkulær fristråle.

$$v_{y} = v_{0} \cdot \frac{K_{a}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{A_{0}}}{y} \cdot \left(1 \pm 0.09 \frac{|\Delta T_{0}| \cdot \sqrt{A_{0}}}{K_{a} \cdot v_{0}^{2}} \left(\frac{y}{\sqrt{A_{0}}}\right)^{2}\right)^{\frac{1}{3}}$$
(C.15)

Hvor:
- v_y Maksimal lufthastighed i luftstrålens centerlinje i y-retning [m/s]
- *v*₀ Indblæsningshastighed i y-retning [m/s]
- *K*_{*a*} Konstant for luftstrømningsarmatur [-]
- A_0 Areal af indblæsningsåbning [m²]
- y Løbende koordinat i y-retning [m²]
- ΔT_0 | Temperaturdifferens mellem indblæsningstemperatur og lufttemperatur i rummet [°C]

I ligning C.15 på forrige side anvendes plus-tegnet når luftstrålens momentum og tyngdekraft virker i samme retning og minus-tegnet anvendes når de virker i modsat retning.

Indtrængningslængden for en vertikal termisk luftstråle er begrænset af luftstrålens retning for momentum og tyngdekraft. En varm nedadrettet luftstråle og kold opadrettet luftstråle har en begrænset indtrængningslængde y_m som er afstanden hvor lufthastigheden i luftstrålens centerlinje er lig 0. Ligning C.16 udtrykker indtrængningslængden for en vertikal termisk cirkulær fristråle.

$$y_m = 3,33 \cdot \sqrt{\frac{K_a \cdot v_0^2 \cdot \sqrt{A_0}}{|\Delta T_0|}}$$
 (C.16)

Hvor:

y _m	Indtrængningslængde [m]
Ka	Konstant for luftstrømningsarmatur [-]
v_0	Indblæsningshastighed i y-retning [m/s]
A_0	Areal af indblæsningsåbning [m ²]
ΔT_0	Temperaturdifferens mellem indblæsningstemperatur og lufttemperatur i rummet [°C]

Temperaturudvikling i luftstråle

Temperaturudviklingen i en luftstråle er forbundet med lufthastighedsudviklingen. Når luftstrålens hastighed er tæt på nul vil luftstrålens temperatur være lig med lufttemperaturen i rummet. Sammenhængen mellem temperaturudviklingen og hastighedsudviklingen i luftstrålen er udtrykt ved ligning C.17 [Nielsen et al., 2013].

$$\frac{\Delta T_x}{\Delta T_0} \approx \frac{u_x}{u_0} \tag{C.17}$$

Hvor:

ΔT_x	Temperaturdifferens mellem punkt og rumtemperatur [°C]
ΔT_0	Temperaturdifferens mellem udetemperatur og rumtemperatur [°C]
u_x	Maksimal hastighed i luftstrålens centerlinje i x-retning [m/s]
u_0	Indblæsningshastighed i x-retning [m/s]

TVÆR- OG OPDRIFTSVENTILATION

I tabel D.1 kan resultater til afsnit 5 af beregnede drivtryk for mulige åbningskombinationer ses. Det kan ses, at kombination med tagvinduerne på nordsiden i alle tilfælde giver det største drivtryk. I tabel D.2 kan parametre til beregning af drivtryk for den kombination fra D.1, hvor der kan opnåes den største trykforskel, ses.

		Åbning 2						
Scenarie	Åbning	FS	NTS	ØTS	FN	TN		
		[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]		
1	NTS	-0,9	-	0,2	-0,9	0,8		
2	FS	-	1,1	1,2	0,0	1,7		
3	ØTS	-0,9	-0,1	-	-0,9	0,5		
4	FS	-	1,6	1,7	1,1	2,2		
5	FS	-	1,5	1,7	0,0	2,3		
6	FS	-	1,2	1,3	0,8	1,6		
7	ØTS	-1,3	-0,2	-	-1,3	0,5		
8	ØTS	-0,8	-0,1	-	-0,5	0,4		
9	ØTS	-1,5	-0,2	-	-0,6	0,5		
10	FS	-	1,1	1,2	0,7	1,6		

Tabel D.1: Beregnede drivtryk ved mulige åbningskombinationer.FS = facadevinduer syd, NTS = nederste tagvinduer syd, ØTS = øverste tagvinduer syd, FN = facadevinduer nord og TN = tagvinduer nord.

Vind					Vindkoefficient				Temperatur		
Scenarie	Retning	Hastighed	Åbning	FS	NTS	ØTS	FN	TN	Inde	Ude	
	[°]	[m/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	$[^{\circ}C]$	$[^{\circ}C]$	
1	265	3,6	NTS	-0,5	-0,6	-0,6	-0,5	-0,6	25,80	11,80	
2	84	4,8	FS	-0,5	-0,6	-0,6	-0,5	-0,6	25,54	14,50	
3	103	3,3	ØTS	-0,5	-0,6	-0,6	-0,5	-0,6	26,60	15,20	
4	299	2,3	FS	0,35	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	26,66	14,70	
5	85	5,9	FS	-0,5	-0,6	-0,6	-0,5	-0,6	25,56	11,80	
6	31	2,0	FS	0,35	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	26,59	18,00	
7	83	4,8	ØTS	-0,5	-0,6	-0,6	-0,5	-0,6	23,92	11,80	
8	34	1,3	ØTS	0,35	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	26,63	17,50	
9	329	2,1	ØTS	0,35	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	26,42	14,60	
10	312	1,8	FS	0,35	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	27,76	17,60	

Tabel D.2: Parametre til beregning af drivkræfter.

					Va	egstråle	Fristråle		Fristråle	
			Vindue	Vindue	Indtr.1.	Punkt	Hast	Temp	Punkt	(m;m)
		Form		A/vindue	X _s	(x,y)	u _{oz}	T_{oz}	(x,y)	x ₀
			[n]	[m ²]	[m]	[m;m]	[m/s]	$[^{\circ}C]$	[m;m]	[m]
1	NTS	Cirk	1	0,028			0,22	21,98	(3,53;1,8)	
		Cirk	2	0,014			0,15	23,10	(3,33;1,8)	
2	FS	Cirk	1	0,038	1,53	(1,21;3,24)	0,30	22,74	(3,52;1,8)	-0,12
			2	0,019	1,39	(1,1;3,15)	0,24	23,33	(3,11;1,8)	-0,11
			3	0,013	1,25	(0,99;3,07)	0,21	23,57	(2,84;1,8)	-0,10
			4	0,010	1,17	(0,92;3,01)	0,19	23,73	(2,66;1,8)	-0,10
		Plan	3	0,012	0,77	(0,61;2,77)	0,18	23,87	(0,61;1,8)	-0,07
			4	0,009	0,71	(0,56;2,73)	0,17	23,98	(0,56;1,8)	-0,06
			5	0,007	0,66	(0,52;2,71)	0,16	24,07	(0,52;1,8)	-0,06
3	ØTS	Cirk	1	0,077			0,23	22,44	(4,95;1,8)	
		Cirk	2	0,038			0,16	22,44	(4,71;1,8)	
4	FS	Cirk	1	0,018	1,52	(1,2;3,23)	0,25	24,51	(3,4;1,8)	-0,12
			2	0,009	1,28	(1,01;3,08)	0,20	24,9	(2,9;1,8)	-0,11
			3	0,006	1,16	(0,92;3,01)	0,18	25,09	(2,64;1,8)	-0,10
		DI	4	0,004	1,08	(0,85;2,96)	0,17	25,22	(2,47;1,8)	-0,10
		Plan	3	0,006	0,70	(0,55;2,73)	0,15	25,32	(0,55;1,8)	-0,06
			4	0,004	0,62	(0,49;2,68)	0,14	25,45	(0,49;1,8)	-0,06
	EC	Cial	3	0,004	0,61	(0,48;2,67)	0,14	25,47	(0,48;1,8)	-0,05
3	F5	Cirk	1	0,020	1,4/	(1,1/;3,2)	0,27	22,88	(3,3;1,8)	-0,12
			2	0,010	1,24	(0,98;5,00)	0,22	23,30	(2,81;1,8) (2,56,1,8)	-0,11
			5 4	0,007	1,12	(0,89,2,99) (0,82,2,04)	0,20	23,01	(2,30,1,8) (2,4,1,8)	-0,10
		Dlan	4	0,005	0.70	(0, 62, 2, 94) (0, 52, 2, 7)	0,10	23,17	(2,4,1,0) (0,52.1,8)	-0,10
		1 1411	3 4	0,000	0,70	(0,32,2,7) (0,47,2,66)	0,17	23,92	(0,32,1,8) (0,47.1,8)	-0,03
			+ 5	0,004	0,02	(0, 47, 2, 00) (0.45, 2.65)	0,15	24,00	(0, 47, 1, 0) $(0.45 \cdot 1.8)$	-0,04
6	FS	Cirk	1	0.071	1 53	(0, +3, 2, 03) (1, 21, 3, 24)	0,13	23.91	(0, +3, 1, 0) (4.1.8)	-0.12
0	15	CIIK	2	0.035	1,55	(1,21,3,24) $(1,21\cdot3,24)$	0.28	23,51	(3,1,0)	-0.12
			3	0.024	1,55	(1,21,3,21) $(1,21\cdot3,24)$	0.24	24.88	(3, 53, 1, 8)	-0.13
			4	0.018	1.53	(1,21;3,24)	0.21	25.07	(3,32,1,8) (3,42;1.8)	-0.13
		Plan	3	0.021	1.10	(0.87;2.97)	0.18	25.25	(0.87:1.8)	-0.09
			4	0,016	1.00	(0,79;2,91)	0.17	25,34	(0,79;1,8)	-0,08
			5	0,012	0,91	(0,72;2,86)	0,16	25,43	(0,72;1,8)	-0,08
7	ØTS	Cirku	1	0,071		,	0,23	19,68	(4,95;1,79)	
		Cirk	2	0,036			0,16	19,68	(4,71;1,79)	
8	ØTS	Cirk	1	0,077			0,20	23,30	(4,97;1,8)	
		Cirk	2	0,039			0,14	23,30	(4,73;1,8)	
9	ØTS	Cirk	1	0,075			0,23	22,16	(4,94;1,8)	
		Cirk	2	0,037			0,16	22,16	(4,7;1,8)	
10	FS	Cirk	1	0,023	1,50	(1,18;3,22)	0,24	25,67	(3,35;1,8)	-0,13
			2	0,011	1,26	(1;3,07)	0,20	26,05	(2,85;1,8)	-0,10
			3	0,008	1,14	(0,9;3)	0,18	26,24	(2,6;1,8)	-0,10
			4	0,006	1,06	(0,84;2,95)	0,16	26,37	(2,44;1,8)	-0,08
		Plan	3	0,007	0,69	(0,55;2,72)	0,15	26,44	(0,55;1,8)	-0,06
			4	0,006	016130	(0,5;2,69)	0,14	26,54	(0,5;1,8)	-0,06
			5	0,005	0,59	(0,47;2,66)	0,13	26,62	(0,47;1,8)	-0,05

Tabel D.3: Beregning af luftstrømninger for facadevinduer.

ENSIDET VENTILATION

Dette bilag beskriver beregningsgangen af luftindstrømningsparametre ved ensidet ventilation af køkken-alrummet. Luftstrømningen ved ensidet ventilation gennem en vinduesåbning passerer ind og ud af samme vindue og derfor ændres luftstrømningen i forhold til ventilation med flere åbninger.

Ved ensidet ventilation anvendes empiriske formler til bestemmelse af ventilationsmængden. Ligning C.6 på side 132 beskriver luftmængden ved ensidet ventilation ud fra åbningsareal, åbningshøjde, vindhastighed og temperaturdifferens mellem inde- og udeluft. Ligningen anvendes til at bestemme det nødvendige åbningsareal i en given situation ud fra et luftmængdebehov. Dernæst kan hastigheden i åbningen bestemmes ud fra princippet for en volumenstrøm vist i i ligning 5.3 på side 58.

For de 10 typiske vinduesudluftningsscenarier, beskrevet i kapitel 4 på side 41, er der beregnet åbningsarealer, som er vist i tabel E.1. Ligeledes angives parametrene for reference vindhastigheden, temperaturforskellen og åbningshøjden, som indgår i beregningen.

	Vindhast.	Temp. diff.	Åbningshøjde	Luftmængde	Åbningsareal	Lufthast.
Scenarie	v10	ΔT	h	q	A_{eff}	V _m
	[m/s]	[K]	[m]	$[m^3/s]$	[m ²]	[m/s]
1	3,6	14,00	0,54	0,022	0,100	0,22
2	4,8	11,04	0,32	0,023	0,099	0,23
3	3,3	11,40	0,54	0,048	0,232	0,21
4	2,3	11,96	0,32	0,025	0,126	0,19
5	5,9	13,79	0,32	0,028	0,106	0,27
6	2,0	8,59	0,32	0,083	0,477	0,17
7	4,8	12,12	0,54	0,046	0,194	0,24
8	1,3	9,13	0,54	0,043	0,253	0,17
9	2,1	11,82	0,54	0,047	0,247	0,19
10	1,8	10,16	0,32	0,027	0,148	0,18

Tabel E.1: Parametre til beregning af åbningsareal og resulterende middelhastighed i åbningen ved ensidet ventilation.

Beskrivelsen af resultater for luftstrømningerne ved ensidet ventilation er angivet i afsnit 5.7.2 på side 65.

					Fristråle		
			Vindue	Vindue	Hast	Temp	Punkt
		Form		A/vindue	u _{oz}	T_{oz}	(x,y)
			[n]	[m ²]	[m/s]	$[^{\circ}C]$	[m;m]
1	NTS	Cirk	1	0,115	0,13	16,73	(2,60;1,80)
			2	0,057	0,09	19,30	(2,50;1,80)
2	FS	Cirk	1	0,110	0,21	14,50	(0,58;1,81)
			2	0,055	0,21	14,50	(0,51;1,81)
			3	0,037	0,21	14,50	(0,48;1,81)
			4	0,027	0,21	14,50	(0,46;1,80)
2	FS	Plan	3	0,067	0,13	18,46	(0,60;1,80)
			4	0,048	0,11	19,55	(0,60;1,80)
			5	0,039	0,10	20,13	(0,60;1,80)
3	ØTS	Cirk	1	0,263	0,14	17,81	(3,96;1,80)
			2	0,132	0,10	17,81	(3,83;1,80)
4	FS	Cirk	1	0,146	0,17	14,70	(0,51;1,80)
			2	0,073	0,17	14,70	(0,45;1,80)
			3	0,049	0,17	14,70	(0,43;1,80)
			4	0,037	0,17	14,70	(0,41;1,80)
4	FS	Plan	3	0,090	0,13	17,76	(0,60;1,80)
			4	0,067	0,11	18,99	(0,60;1,80)
			5	0,051	0,09	19,94	(0,60;1,80)
5	FS	Cirk	1	0,117	0,24	11,80	(0,60;1,80)
			2	0,058	0,24	11,80	(0,53;1,80)
			3	0,039	0,24	11,80	(0,50;1,80)
			4	0,029	0,24	11,80	(0,47;1,80)
5	FS	Plan	3	0,071	0,16	16,50	(0,60;1,80)
			4	0,051	0,14	17,85	(0,60;1,80)
			5	0,040	0,12	18,74	(0,60;1,80)
6	FS	Cirk	1	0	0	0	(0;0)
			2	0	0	0	(0;0)
			3	0,181	0,15	18	(0,50;1,92)
			4	0,136	0,15	18	(0,47;1,92)
6	FS	Plan	3				
			4				
			5	0,160	0,15	18,07	(0,60;1,80)
7	ØTS	Cirk	1	0,216	0,15	15,51	(4,02;1,80)
			2	0,108	0,10	15,51	(3,89;1,80)
8	ØTS	Cirk	1	0,292	0,12	19,18	(3,91;1,80)
			2	0,146	0,09	19,18	(3,78;1,80)
9	ØTS	Cirk	1	0,287	0,13	16,84	(3,89;1,80)
			2	0,143	0,10	16,84	(3,77;1,80)
10	FS	Cirk	1	0,115	0,16	17,60	(0,53;1,80)
			2	0,085	0,16	17,60	(0,47;1,80)
			3	0,057	0,16	17,60	(0,44;1,80)
			4	0,043	0,16	17,60	(0,42;1,80)
10	FS	Plan	3	0,108	0,13	19,47	(0,60;1,80)
			4	0,028	0,11	20,73	(0,60;1,80)
			5	0,061	0,10	21,52	(0,60;1,80)

Tabel E.2: Parametre til beregning af åbningsareal og resulterende middelhastighed i åbningen ved ensidet ventilation

TEORI OM NUMERISK MODELLERING AF LUFTSTRØMNINGER I RUM

Dynamikken i luftstrømninger i rum kan beskrives ved transportligninger for masse, momentum og energi. Transporten kan skabes ved strømningsbevægelser i samme retning som strømningen (konvktion) eller ved strømningsbevægelser i vilkårlig retning i strømningen (diffusion). [Versteeg and Malalasekera, 2007]

F.0.7 Strømningsligninger

Det matematiske grundlag for simulering og forudsigelse af luftstrømningsforhold i rum er baseret på løsningen af fundementale strømningsligninger. Strømningsligningerne består af et sæt transportligninger som er udtrykt ved kontinuitetsligningen, tre momentumligninger - én i hver af koordinatsystemets x-, y- og z-retning, én energiligning og hvis det ønskes undersøgt også én koncentrationsligning. Følgende ligninger beskriver de fundamentale strømningsligninger for henholdsvis masse, momentum og energi i en stationær, sammentrykkelig og viskos strømning i et 3D domæne. [Nielsen et al., 2007]

Kontinuitetsligningen, udtrykt ved ligning F.1 er udledt ved loven om massebevarelse, hvilket beskriver at massestrømmen ind i et givet volumen har samme størrelse som massestrømmen ud af volumenet. [Munson et al., 2013]

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} = 0$$
(F.1)

Hvor:

- *u* | Hastighed i x-retning [m/s]
- v Hastighed i y-retning [m/s]
- *w* | Hastighed i z-retning [m/s]
- ρ | Luftens densitet [kg/m³]

Momentumligningerne der udtrykker hastighedsniveauet i en strømning referes ofte som Navier-Stokes ligningerne. Ligningerne for momentum i en strømning er givet for x-, y- og z-retning ved henholdsvis ligning F.2, F.3 på den følgende side og F.4 på næste side. De er udledt ved antagelse af momentumbevarelse, som er produktet af massen og hastigheden af en strømning. Momentum kan transporteres ved konvektion, men beskriver også transporten af viskose kræfter og turbulens i strømningsbevægelserne. [Munson et al., 2013]

$$\frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial x} \cdot u + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial y} \cdot v + \frac{\partial(\rho \cdot u)}{\partial z} \cdot w = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)$$
(F.2)

$$\frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial x} \cdot u + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial y} \cdot v + \frac{\partial(\rho \cdot v)}{\partial z} \cdot w = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho \cdot g_y + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)$$
(F.3)

$$\frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial x} \cdot u + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial y} \cdot v + \frac{\partial(\rho \cdot w)}{\partial z} \cdot w = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)$$
(F.4)

Hvor:

- *u* Hastighed i x-retning [m/s]
- v Hastighed i y-retning [m/s]
- *w* Hastighed i z-retning [m/s]
- ρ | Luftens densitet [kg/m³]
- g_y Tyngdeacceleration i negativ y-retning [m/s²]
- μ Dynamisk viskositet [N·s/m²]

Energiligningen der udtrykker temperaturniveauet i en strømning er givet ved ligning F.5. Ligningen er udledt på samme måde som kontinuitetsligningen i kombination med termodynamikkens først lov, som udtrykker at en forøgelse af energi i et given volumen er lig det udførte arbejde på volumenet. [Munson et al., 2013]

$$\rho \cdot c_p \cdot \left(\frac{\partial (T \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial (T \cdot v)}{\partial y} + \frac{\partial (T \cdot w)}{\partial z}\right) = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)$$
(F.5)

Hvor:

- *u* Hastighed i x-retning [m/s]
- v Hastighed i y-retning [m/s]
- w | Hastighed i z-retning [m/s]
- ρ | Luftens densitet [kg/m³]
- c_p | Specifik varmekapacitet [J/kg·K]
- T | Luftens temperatur [°C]
- λ Varmeledningsevne [W/m·K]

Strømningsligningerne løses ofte ved anvendelse af et tidsgennemsnit for den lokale turbulensværdi og lokale fluktuationsværdi, hvormed den lokale turbulens kan udtrykkes ved den turbulente viskositet. Den turbulente viskositet kan beregnes ud fra yderligere to transportligninger som er ligningen for turbulent kinetisk energi og ligningen for spredningen af turbulent kinetisk energi. Antallet af strømningsligninger som beskriver lufthastigheds-, lufttemperatur-, koncentrationsog strømningsforhold i rum bliver derfor i alt otte differentialligninger. Differentialligningerne er koblet sammen og samtidig ikke-liniære i sine differenskvotienter, hvilket gør at et givet strømningsdomæne ikke kan løses ud fra en direkte metode, men derimod kun ved anvendelse af en numerisk metode. [Nielsen et al., 2007]

F.0.8 Numerisk metode

Den numeriske metode, som anvendes til løsning af de fundementale strømningsligninger i en given strømningssituation, er Finite Volume Method (FVM). Ved FVM opdeles strømningsfeltets løsningsdomæne i et bestemt antal mindre kontrolvolumener. Hermed integreres strømningsligningerne over hvert kontrolvolumen i løsningsdomænet. Dernæst anvendes en diskretiseringsmetode, hvor der sker en udskiftning af integrationsligningerne med differensligninger, hvorved der fremkommer et system af algebraiske ligninger som kan løses ved en iterativ metode. Fordi FVM anvender integrationsligninger over hvert kontrolvolumen opnås en tæt sammenhæng mellem den numeriske beskrivelse og den fysiske betragtning af en given strømningssituation. [Nielsen et al., 2007]

Den generelle form af strømningsligningerne, som udtrykker stationær strømning ved konvektion og diffusion, er givet ved ligning F.6. [Nielsen et al., 2007]

$$div(\boldsymbol{\rho}\cdot\boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{\phi}) = div(\boldsymbol{\Gamma}\cdot\boldsymbol{\nabla}\cdot\boldsymbol{\phi}) + S_{\boldsymbol{\phi}}$$
(F.6)

Hvor:

- ϕ Generel transport variable [-]
- Γ Diffusionskoefficient [kg/(m · s)]
- ∇ Differensoperator [-]
- S Kilde [-]

Ved integration af den generelle strømningsligning, givet ved ligning F.6 over et kontrolvolumen, fremkommer ligning F.7. Ligningen udtrykker strømningsbalancen i et kontrolvolumen, hvor venstresiden indeholder strømning ved konvektion ud af et kontrolvolumen og højresiden indeholder strømning ved diffusion ind i et kontrolvolumen, samt generering og destruktion af den generelle transport variable ϕ inde i et kontrolvolumen.

$$\int_{A} \mathbf{n} \cdot (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{u} \cdot \boldsymbol{\phi}) dA = \int_{A} \mathbf{n} \cdot (\boldsymbol{\Gamma} \cdot \nabla \cdot \boldsymbol{\phi}) dA + \int_{CV} S_{\phi} dV$$
(F.7)

Efter integration af den generelle strømningsligning anvendes en diskretiseringsmetode for at frembringe en række algebraiske ligninger som kan løses ved en numerisk beregningsmetode. I den numeriske metode anvendes hybrid diskretiseringsmetoden til løsning af den generelle form af strømningsligningerne. Hybrid diskretiseringsmetode anvendes også i det kommercielle CFD-program FloVENT 9.3, hvor den anvender en kombination af central differens diskretisering og 1. ordens upwind diskretisering for at opnå den mest stabile og korrekte løsningsmetode. [Munson et al., 2013]

F.0.9 Turbulensmodel

Modellering af turbulens i et strømningsdomæne kan overordnet eksekveres på tre forskellige måder. Det kan foregå ved Direct Numerical Simulation (DNS), Large Eddy Simulation (LES) og Reynolds Average Navier Stokes simulation (RANS). Ved DNS løses Navier-Stokes ligningerne ved en direkte løsningsmodel, hvor løsningsdomænet beregningsnet skal være stort nok til at behandle de største hvirvler og lille nok til at løse de mindste turbulente hvirvler. Turbulent modellering ved LES behandler kun de største turbulente hvirvler hvor de mindste hvirvler løses ved analytiske approksimationer. Ved RANS turbulent modellering, som anvendes i det kommercielle CFD-program FloVENT, bliver hele det turbulent spektrum i strømningsdomænet modelleret ved at inkludere Reynolds spændinger. [Versteeg and Malalasekera, 2007]

I dag er $k - \varepsilon$ turbulensmodel, den mest anvendte RANS-model i kommercielle CFDsimuleringsprogrammer. $k - \varepsilon$ turbulensmodellen beskriver et turbulent strømningsfelt ved at anvende turbulente hvirvlers viskositet ud fra den turbulente kinetiske energi (k) og spredningen af den turbulente kinetiske energi (ε) givet ved ligning F.8. [Versteeg and Malalasekera, 2007]

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{F.8}$$

Hvor:

$$\mu_t$$
 Variable [-]

 ρ Luftens densitet [kg/m³]

 C_{μ} Konstant [-]

- *k* Turbulent kinetisk energi $[m^2/s^2]$
- ε Spredning af turbulent kinetisk energi [m²/s³]

Alle turbulensmodeller indeholder stærke og svage sider i forhold til at gengive den mest præcise repræsentation af et turbulent strømningsfelt. $k - \varepsilon$ turbulensmodellen giver en tilfredsstillende repræsentation af de fleste turbulente strømningsfelter og har samtidig en kort beregningstid i forhold til andre turbulensmodeller. Modellen kan dog overestimere forskydningsspændingerne nær randen af et strømningsfelt hvorved semi-empiriske approksimationer er nødvendige. Ved anvendelse af $k - \varepsilon$ turbulensmodellen tilføjes to ekstra transportligninger til strømningsligningerne for bestemme (k) og (ε), udtrykt ved ligning F.9 og ligning F.10. [Versteeg and Malalasekera, 2007]

$$\frac{\partial(\rho \cdot u_i \cdot k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i}\right) + P_k - \rho \cdot \varepsilon$$
(F.9)

$$\frac{\partial(\rho \cdot u_i \cdot \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot \left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right) + \frac{\varepsilon}{k} \cdot (C_1 \cdot P_k - C_2 \cdot \rho \cdot \varepsilon)$$
(F.10)

$$P_k = \mu_t \cdot \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \cdot \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

Hvor:

$$C_{\mu} = 0.09$$
, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_{\varepsilon} = 1.3$

NETPUNKTSANALYSE BILAG

Dette bilag viser netpunktsanalysens CFD-simuleringer af lufthastigheds- og lufttemperaturniveauet i testpunkterne opz16-opz45 på grænsen af opholdszonen. Derudover angives CFD-resultaterne ved interpolation mellem celleværdierne for hastigheds- og temperaturfeltet i modellens XY-plan (Z=3,5 m) og XY-plan (Z=5,5 m) ved stigende kvalitet af beregningsnettet.



Figur G.1: Celleantallets indflydelse på hastigheden i testpunkterne opz16-opz30 med koordinaterne som angivet i tabel 6.4 på side 77.



Figur G.2: Celleantallets indflydelse på hastigheden i testpunkterne opz31-opz45 med koordinaterne som angivet i tabel 6.4 på side 77.



Figur G.3: Celleantallets indflydelse på temperaturen i testpunkterne opz16-opz30 med koordinaterne som angivet i tabel 6.4 på side 77.



Figur G.4: Celleantallets indflydelse på temperaturen i testpunkterne opz31-opz45 med koordinaterne som angivet i tabel 6.4 på side 77.







Figur G.6: Visualisering af lufthastighedsfeltet i køkken-alrummet ved interpolering mellem celleværdierne i XY-planet (Z=5,5 m) ved stigende kvalitet af beregningsnettet.







Figur G.8: Visualisering af lufthastighedsfeltet i køkken-alrummet ved interpolering mellem celleværdierne i XY-planet (Z=3,5 m) ved stigende kvalitet af beregningsnettet.







Figur G.10: Visualisering af lufttemperaturfeltet i køkken-alrummet ved interpolering mellem celle-værdierne i XY-planet (Z=3,5 m) ved stigende kvalitet af beregningsnettet.

CFD BENCHMARK 2D TEST

Formålet med CFD Benchmark 2D testen er at opnå en større indsigt i CFD-simulering af luftstrømnings-, hastigheds- og temperaturforhold i et ventileret rum. Benchmarktesten udføres i det kommercielle CFD program FloVENT V9.3, hvilket muliggør en validering af programmets evne til at beregne strømningsfeltet, hastigheder og temperaturer. Resultaterne af CFD-simuleringerne i FloVENT V9.3 sammenlignes med målinger for samme Benchmark test udført af Heiner Schwenke [Schwenke, 1974] og Peter V. Nielsen [Nielsen, 1990] [Nielsen et al., 1979].

CFD Benchmark 2D testen består af to CFD-analyser som undersøger forskellige luftstrømningsforhold i et ventileret rum. Den første analyse undersøger luftstrømningsforholdene ved isotermisk strømning, hvor der ikke er nogen temperaturdifferens mellem rummets indblæsning og udsugning. Den anden analyse undersøger luftstrømningsforholdene i samme rum ved ikke-isotermisk strømning, hvor der sker en ændring af temperaturniveauet mellem indblæsning og udsugning, hvilket også påvirker rummets globale Ar-tal. Analyserne laves som en stationær CFD-beregning i et ventileret rum med ens geometrisk opbygning, som sammenlignes med målinger af lufthastigheder og turbulensintensitet udført af Peter V. Nielsen [Nielsen, 1990].

H.1 Beregningsmodel for CFD Benchmark 2D testen

Beregningsmodellen for CFD Benchmark 2D testen ved isotermisk og ikke-isotermisk strømning er udført som en stationær beregning med $k - \varepsilon$ turbulensmodel. Ved isotermisk strømning beregnes lufthastighedsfelet i CFD-modellen ved en momentumligning i henholdsvis x- og ykomposantens retning. Ved ikke-isotermisk strømning tilføjes en energiligning til udregning af lufttemperaturen. Den geometriske opbygning af rummet i CFD Benchmark 2D testen er vist på figur H.1 på næste side.



Figur H.1: Geometrisk opbygning af CFD Benchmark 2D testen til CFD-simulering og målinger [Nielsen, 1990].

Tabel H.1 angiver specifikationer ved den geometriske opbygning som også kan ses på figur H.1.

Specifikation	Værdi	Enhed
Н	3,00	[m]
L	9,00	[m]
W	1,00	[m]
h_0	0,168	[m]
t	0,48	[m]
L/H	3	[-]
h/H	0,056	[-]
t/H	0,16	[-]

Tabel H.1: Specifikationer for modelgometrien i CFD Benchmarktesten.

For at sammenligne resultaterne af CFD Benchmark 2D testen ved isotermisk luftstrømning og ikke-isotermisk strømning med måleresultater er der indlagt fire planer med testpunkter i CFD-modellen som kan ses på figur H.2 på modstående side. De fire planer med testpunkter har samme lokalitet i CFD-modellen som testpunkterne i målingerne og anvendes til at simulere hastighedsfeltet i CFD-modellen. De fire planer beståer af to horisontale planer som er placeret ud for modellens indblæsnings- og udsugningsåbning og givet ved ligning H.1 samt to vertikale planer givet ved ligning H.2. [Nielsen, 1990]

$$y_1 = \frac{h_0}{2} = \frac{0.168 \, m}{2} = 0.084 \, m$$
, $y_2 = H - \frac{h_0}{2} = 3 \, m - \frac{0.168 \, m}{2} = 2.916 \, m$ (H.1)

$$x_1 = H = 3m$$
, $x_2 = 2 \cdot H = 2 \cdot 3m = 6m$ (H.2)



Figur H.2: Skitse af de to horisontale og vertikale planer hvor der er foretage målinger af lufthastigheden.

Figur H.3 viser opbygningen af CFD Benchmark 2D testen i FloVENT. Modellens indblæsningsåbning er placeret øverst til venstre og udsugningsåbningen er placeret nederst til højre. Derudover ses placeringen af modellens testpunkter i de fire planer som anvendes til sammenligning med målinger af lufthastigheds- og temperaturforhold i rummet. Testpunkternes indbyrdes placering i de fire plan er tættest ved indblæsnings- og udsugningsåbningen for at opnå det mest retvisende billede af luftstrålens hastigheds- og temperaturfelt.



Figur H.3: 3D-visualisering af CFD-beregningsmodellen og placering af testpunkter i FloVENT V9.3 [Mentor Graphics Corporation, 2012].

Nedenstående udtryk angiver de fysiske specifikationer og randbetingelser for luften i indblæsningsåbningen, som anvendes i både den isotermiske og ikke-isotermisk Benchmark test. Først bestemmes indblæsningshastigheden ved et konstant Reynolds-tal på 5000 og en kinematisk viskositet ved en indblæsningstemperatur på 20 °C ved ligning H.3.

$$Re = \frac{h_0 \cdot u_0}{v} = \frac{0.168 \cdot u_0}{15.3 \ 10^{-6}} = 5000 \Rightarrow u_0 = 0.455 \ m/s \tag{H.3}$$

Hvor:

Re Reynolds-tal [-] *h*₀ Indblæsningshøjde [m] *v* Kinematisk viskositet [m²/s] *u*₀ indblæsningshastighed [m/s]

Dernæst bestemmes specifikationer for den turbulente kinetiske energi, som angiver den kinetiske energi pr. masseenhed og er forbundet med de turbulente hvirvler i luftstrømningen. Den turbulente kinetiske energi er givet ved ligning H.4 [Nielsen, 1990]. Derudover bestemmes den turbulente spredningsrate i indblæsningsåbningen, som udtrykker hvor hurtigt den kinetiske energi omdannes til termisk energi. Den turbulente spredningsrate er givet ved ligning H.5.

$$k_0 = 1.5 \cdot (0.04 \cdot u_0)^2 = 1.5 \cdot (0.04 \cdot 0.455)^2 = 0.000497 J/kg$$
(H.4)

$$\varepsilon = \frac{k_0^{1,5}}{\frac{h_0}{10}} = \frac{0,000497^{1,5}}{\frac{0,168}{10}} = 0,000659 \, W/kg \tag{H.5}$$

Hvor:

 k_0 Turbulent kinetisk energi [J/kg]

*u*₀ Indblæsningshastighed [m/s]

ε Turbulent spredningsrate [W/kg]

 h_0 Indblæsningshøjde [m]

H.2 Netpunktsanalyse for Benchmark 2D testen

For at opnå det bedste grundlag for sammenligning af CFD-resultaterne med målinger laves en netpunktsanalyse for CFD-modellen af Benchmark 2D testen. I en netpunktsanalyse øges antallet af celler i modellen indtil ændringen i CFD-resultaterne er minimal. Herved sikres det at modellens resultater af hastigheds- temperaturfeltet er uafhængigt af beregningsnettets størrelse for at opnå de bedste resultater. Figur H.4 på næste side og figur H.5 på modstående side viser resultater af netpunktsanalysen for testpunkterne i planet $y_1 = 0,084$ og planet $y_2 = 2,916$. Testpunkterne er placeret med en afstand på 1 m fra væggen med en indbyrdes afstand på 1 m. Ved sammenligning af de to figurer vurderes det at modellens resultater for hastighedsfeltet er uafhængigt af beregningsnettets størrelse ved et beregningsnet på ca. 20000 celler. Derfor anvendes et beregningsnet på 240x80 = 19200 celler ved beregningerne af hastigheds-, temperaturog strømningsfelt i CFD benchmark 2D testen.



Figur H.4: Resultater for netpunktsanalysen i planet $y_1 = 0,084$ for h/H = 0,056 og Re = 5000.



Figur H.5: Resultater for netpunktsanalysen i planet $y_2 = 2,916$ for h/H = 0,056 og Re = 5000.

Figur H.6 på næste side viser startmodellen for netpunktsanalysen, som er lavet med et beregningsnet på 100x30 = 3000 celler. Sammenlignet med figur H.7 på den følgende side som viser resultatet for slutmodellen med et beregningsnet på 240x80 = 19200 celler er det tydeligt og se en forskel på strømningslinjernes opløsning og placering i hastighedsfeltet. Det er blandt andet tydeligt og se forskellen mellem strømningslinjerne i hjørnerne af modellen samt i området omkring luftstråens konstante hastighedskerne.



Figur H.6: Visualisering af lufthastighedsfelt ved strømningslinjer for CFD Benchmark 2D testen ved isotermisk strømning. Beregningsnettets størrelse er 100x30 = 3000 celler for h/H = 0,056 og Re = 5000.



Figur H.7: Visualisering af lufthastighedsfelt ved strømningslinjer for CFD Benchmark 2D testen ved isotermisk strømning. Beregningsnettets størrelse er 240x80 = 19200 celler for h/H = 0,056 og Re = 5000.

H.3 Benchmark 2D isotermisk test

CFD-modellen til Benchmark 2D isotermisk testen er udført kun med adiabatiske overflader, hvormed der ikke opstår en varmeoverførsel fra overfladerne og ind i rummet. Derved påvirkes luftstrålen kun af momentumbevægelserne i indblæsningsåbningen som også kan ses på figur H.8 på næste side. Alle CFD-simuleringer af Benchmark 2D isotermisk testen udføres med et beregningsnet på 240x80 = 19200 celler, da denne størrelse af beregningsnettet viste at simuleringsresultaterne ikke længere var afhængig af nettes størrelse.



Figur H.8: Visualisering af lufthastighedsfelt ved interpolering mellem celleværdierne for CFD Benchmark 2D testen ved isotermisk strømning. Beregningsnettets størrelse er 240x80 = 19200 celler for h/H = 0,056 og Re = 5000.

Figur H.9 viser lufthastighedsfeltet ved strømningslinjer i rummet. Figurens øverste venstre hjørne viser luftstrålen i indblæsningsåbningen, hvor det er muligt at se længden på luftstrålens konstante hastighedsprofil angivet ved den hvide trekant. Derudover viser figurens øverste højre hjørne et område, hvor hastighedsvektorerne skifter retning mange gange hvilket indikerer stor luftrecirkulation indenfor et forholdsvist lille område.



Figur H.9: Visualisering af lufthastighedsfelt ved strømningslinjer for CFD Benchmark 2D testen ved isotermisk strømning. Beregningsnettets størrelse er 240x80 = 19200 celler for h/H = 0,056 og Re = 5000.

Figur H.10 på næste side og H.11 på side 165 angiver CFD-simuleringsresultater og måleresultater af gennemsnitlige lufthastigheder og RMS hastigheder i tespunkterne i de vertikale plan $x_1 = 3$ m og $x_2 = 6$ m og i de horisontale plan $y_1 = 0,084$ m og $y_2 = 2,916$ m. RMS hastigheden afhænger af luftstrålens turbulensintensitet, turbulente kinetisk energi og indblæsningshastigheden. RMS hastigheden er givet ved ligning H.6 og får yderligere forklaring til RMS hastigheden henvises til [Nielsen, 1990].

$$RMS = \frac{\frac{\sqrt{k}}{1,1}}{u_0} \tag{H.6}$$

Hvor:

- k_0 | Turbulent kinetisk energi [J/kg]
- *u*₀ Indblæsningshastighed [m/s]

Figur H.10 viser en god korrelation mellem resultaterne af CFD-simuleringerne og målingerne. Ved sammenligning af den gennemsnitlige lufthastighed for CFD-simuleringer med målinger fremkommer et hastighedsprofil som er typisk for en strømning skabt af en vægstråle. Dermed kan det konstateres at luftstråletypen i rummets øverste strømningsområde antager en vægstråle. Derudover ses det, at i størstedelen af det vertikale plan $x_1 = 3$ m er både CFD-resultaterne og målinger af RMS hastigheden forholdsvis tæt på den gennemsnitlig hastighed, hvilket indikerer et turbulent område i rummet.



Figur H.10: CFD simularing og måling af lufthastighed og RMS hastighed i test punkter. (1) angiver testpunkter for vertikale plan $x_1 = 3 \text{ m}$, og (2) angiver testpunkter for det vertikale plan $x_2 = 6 \text{ m}$. Beregningsnettets størrelse er 240x80 = 19200 celler for h/H = 0,056 og Re = 5000.

Figur H.11 på næste side viser også en god korrelation mellem CFD-resultater og målinger. Her illustreres det at hastigheden i luftstrålen aftager med afstanden til indblæsningsåbningen. Derudover viser figur H.11 på modstående side i det horisontale plan $y_1 = 0,084$ m en meget lille afvigelse mellem den gennemsnitlige lufthastighed og RMS hastigheden i området 0-3 m, hvilket indikerer en stor strømningsrecirkulation i netop dette område. Det samme er gældende for det horisontale plan $y_1 = 2,916$ m i området 8-9 m. Figurerne viser med tydelighed at der opstår stor tubulens og recirkulation i rummets øverste højre hjørne længst fra indblæsningsåbningen, og i rummets nederste venstre højrne under indblæsningsåbningen. Dette er også i overenstemmelse med lufthastighedsvektorerne for hele rummet som angiver en recirkulation af luft startende og sluttende ved rummets indblæsningsåbning. [Nielsen, 1990]



Figur H.11: CFD simularing og måling af lufthastighed og RMS hastighed i test punkter. (1) angiver testpunkter for horisontale plan $y_1 = 0,084$ m, og (2) angiver testpunkter for det horisontale plan $y_2 = 2,916$ m. Beregningsnettets størrelse er 240x80 = 19200 celler for h/H = 0,056 og Re = 5000.

H.4 Benchmark 2D ikke-isotermisk test

CFD Benchmark 2D ikke-isotermisk testen udføres med henblik på at undersøge hastighedsog temperaturniveauet i luftstrålen ved ændring af Ar-tal og Re-tal. Dernæst sammenlignes resultaterne af CFD-simuleringerne med målinger udført af Heiner Schwenke [Schwenke, 1974] og Peter V. Nielsen [Nielsen et al., 1979]. CFD-modellen til Benchmark 2D ikke-isotermisk testen er udført med adiabatiske overflader med undtagelse af modellens gulvkonstruktion. For at undersøge luftstrømningen i rummet under indflydelse af termisk opdrift tilføres en jævnt fordelt varmebelastning angivet som en konstant varmestrøm fra modellens gulvkonstruktion. Hertil anvendes Ar-tallet som angiver forholdet mellem effekten af den termiske opdrift i strømningen og effekten af strømningens momentum. Ar-tallet er givet ved ligning H.7. Alle CFD-simuleringer af Benchmark 2D ikke-isotermisk testen udføres med et beregningsnet på 240x80 = 19200 celler, da simuleringsresultaterne viste sig uafhængige af nettes størrelse.

$$Ar = \frac{\beta \cdot g \cdot h_0 \cdot \Delta T}{u_0^2} \tag{H.7}$$

Hvor:

- Ar Archimedes-tallet [-]
- β Termisk ekspansionskoefficent [1/°C]
- g Tyngdeacceleration $[m/s^2]$
- h_0 Indblæsningshøjde [m]
- ΔT | Temperaturdifferens mellem indblæsnings- og udsugningsluft [°C]
- *u*₀ Indblæsningshastighed [m/s]

Undersøgelsen af effekten ved termisk opdrift på luftstrømningen i rummet foregår ved ændring af temperaturdifferensen i udtrykket for Ar-tallet. Der anvendes samme temperaturdifferens i den stationære energiligning givet ved ligning H.8.

$$Q = \rho \cdot q \cdot c_p \cdot \Delta T \tag{H.8}$$

Hvor:

- Q Varmestrøm [W]
- ρ Luftens densitet [kg/m³]
- *q* Volumenstrøm i indblæsningsåbningen [m³/s]
- c_p | Specifik varmekapacitet [J/kg · K]
- ΔT | Temperaturdifferens mellem indblæsnings- og udsugningsluft [°C]

Tabel H.2 angiver for CFD-simuleringerne, den beregnede og simulerede temperaturdifferens mellem indblæsnings- og udsugningsluften, varmestrømmen fra gulvkonstruktionen og beregnet og simuleret Ar-tal. Der vurderes at være en god overenstemmelse mellem det beregnede Ar-tal og simulerede Ar-tal eftersom afvigelsen for alle CFD-simuleringerne er under 3%.

Resultaterne af CFD-simuleringerne fra tabel H.2 kan ses på figur H.14 på side 168 og figur H.15 på side 169.

Tilført varmestrøm	Temperaturdifferens				
ved gulvniveau	Beregnet	simuleret	Beregnet	Simuleret	Afvigelse
[W]	[°	C]	[-]	[-]	[%]
67,65	0,74	0,74	0,01964	0,01959	0,23
135,30	1,48	1,46	0,03927	0,03873	1,38
202,95	2,22	2,25	0,05891	0,05982	1,55
270,60	2,96	2,92	0,07855	0,07754	1,28
338,25	3,7	3,63	0,09818	0,09644	1,78
405,90	4,44	4,36	0,11782	0,11576	1,75
473,55	5,18	5,32	0,13746	0,14109	2,64
541,20	5,92	5,78	0,15710	0,15325	2,45

Tabel H.2: Beregnings- og simuleringsresultater for CFD-simuleringer af Benchmark 2D ikkeisotermisk test.

H.4.1 Luftstrålens indtrængningslængde vs. Ar-tallet

Figur H.12 viser CFD-simulering af strømningslinjerne ved en jævnt fordelt varmebelastning ved gulvniveau på 135,30 W, hvilket giver et Ar-tal på 0,04. Sammenlignet med figur H.9 på side 163 er der sket en reduktion af indtrængningslængden og opnået generelt højere lufthastigheder ved gulvniveau. Derudover er der opnået større opblanding af rumluften illustreret ved den mindre afstand mellem strømningslinjerne. Derudover er fordelingen af strømningslinjerne på figur H.12 meget ens med CFD-simuleringer af en tilsvarende ikke-isotermisk test i [Nielsen et al., 1979].



Figur H.12: Visualisering af lufthastighedsfelt ved strømningslinjer for CFD Benchmark 2D testen ved ikke-isotermisk strømning. Beregningsnettets størrelse er 240x80 = 19200 celler for h/H = 0,056, Re = 5000 og Ar = 0,04.

Figur H.13 viser CFD-simulering af temperaturfordelingen i rummet udtrykt ved isotermer. Her illustreres hvordan den tilførte varmestrøm ved gulvniveau påvirker den koldere indblæsningsluft, hvormed luftstrålens indtrængningslængde reduceres. Isotermernes fordeling fra gulvniveau til loft stemmer meget overens med CFD-simuleringer af en tilsvarende ikke-isotermisk test i [Nielsen et al., 1979]. Den højeste lufttemperatur i rummet opstår i hjørnet under indblæsningen hvilket også er punktet for den længste strækning som den koldere luftstråle har tilbagelagt i rummet. Dermed bliver den koldere luft fra indblæsningen opblandet med eksisterende rumluft før den når dette punkt.



Figur H.13: Visualisering af temperaturfeltet ved isotermer for CFD Benchmark 2D testen ved ikke-isotermisk strømning. Beregningsnettets størrelse er 240x80 = 19200 celler for h/H = 0,056, Re = 5000 og Ar = 0,04.

Figur H.14 på næste side angiver måleresultater og CFD-simuleringer for sammehængen mellem

Ar-tallet og luftstrålens indtrængningslængde i rummet. Der er foretaget CFD-simuleringer startende ved et Ar-tal på 0,02, hvorefter Ar-tallet er forøget indtil en betragtelig reduktion af luftstrålens indtrængningslængde er opnået. Benchmark 2D ikke-isotermisk testen er udført for h/H = 0,056, hvorfor simuleringsresultaterne gerne skulle være tæt på grafen for h/H = 0,05 [Nielsen, 1990]. Figuren viser at CFD-resultalerne af luftens indtrængningslængde er meget længere i forhold til måleresultaterne. Det er dog muligt at se en tydelig tendens, hvor en forøgelse af Ar-tallet og dermed effekten af den termiske opdrift, reducerer luftstrålens indtrængningslængde.



Figur H.14: Sammenhæng mellem luftstrålens indtrængningslængde og Ar-tal. Beregningsnettets størrelse er 240x80 = 19200 celler for h/H = 0,056 og Re = 5000. Målingerne er udført af Heiner Schwenke [Schwenke, 1974].

Figur H.15 på modstående side viser luftstrålens hastighedsudvikling fra rummets indblæsningsåbning til udsugning ved variation af Ar-tallet. Jo højere Ar-tallet bliver på grund af varmetilførsel til rummet, jo mere falder hastighedsniveauet i luftstrålen på grund af en stærk termisk effekt. Figuren viser også det faktum at hastighedsniveauet i planet ud for indblæsningen falder betragteligt med afstanden til indblæsningen hvorved der opstår en separation mellem luftstrålen og loftet. Ved et Ar-tal mellem 0,04 og 0,06 falder hastighedsniveauet meget sammenlignet med variationen mellem de andre anvendte Ar-tal. Yderligere forøgelse af Ar-tallet viser en konstant reduktion af hastighedsniveauet i luftstrålen, hvilket også er i overenstemmelse med målinger på figur H.14.



Figur H.15: Sammenhæng mellem luftstrålens indtrængningslængde og Ar-tal. Beregningsnettets størrelse er 900x300 = 270000 celler for h/H = 0,056 og Re = 5000.

H.4.2 Luftstrålens temperaturniveau vs. Ar-tallet

Figur H.16 viser temperaturniveauet i luftstrålen ved forskellige Ar-tal og afstande i xretningen fra indblæsningen. Der foretaget målinger af tre forskellige Ar-tal ved fire afstande fra indblæsningen. Temperaturniveauet på figurens y-akse er bestemt som lufttemperaturen T i testpunktet, minus indblæsningstemperaturen T₀, divideret med temperaturdifferensen ΔT_0 , mellem udsugning og indblæsning. Generelt er målingerne foretaget ved meget små Ar-tal hvorfor effekten fra den termiske opdrift i rummet er meget lille sammenlignet med effekten af momentum luftstrømningen. I CFD-simuleringerne anvendes også et lille Ar-tal som er det samme der er anvendt i [Nielsen et al., 1979]. Samtidig viser figuren at ved et konstant Re-tal vil sammenhængen mellem forskellige Ar-tal og temperaturniveauet i lutstrålen antage den samme tendens som ses på figur H.16.



Figur H.16: Sammenligning af temperaturprofiler i luftstrålen ved ændring af Ar-tallet i y = $0,75 \cdot H$. Beregningsnettets størrelse er 240x80 = 19200 celler for h/H = 0,056 og Re = 7100. Målingerne er udført af Peter V. Nielsen [Nielsen et al., 1979].

H.4.3 Luftstrålens hastighedsniveau i returstrømningen vs. Ar-tallet

For at evaluere luftstrålens maksimale lufthastighed i returstrømningen i rummets opholdszone er der indsat 4 ekstra testpunkter i afstanden $\frac{2}{3} \cdot L$ fra indblæsningsåbningen ved gulvniveau [Nielsen et al., 2013]. Figur H.17 på den følgende side viser CFD-resultaterne for de maksimale lufthastigheder i returstrømningen i opholdszonen ved variation Ar-tallet sammenlignet med målinger. Det ses at en forøgelse af Ar-tallet medfører en forøgelse af hastighedsniveauet i luftstrålens returstrømning ved gulvniveau. Det samme luftstrømningsprincip er gældende ved sammenligning af figur H.9 på side 163 som viser en isotermisk strømningstest og figur H.12 på side 167 som viser en ikke-isotermisk strømningstest med et Ar-tal på 0,04.



Figur H.17: Sammenligning af CFD-resultater og målinger af den maksimale lufthastighed i returstrømningen ved ændring af Ar-tallet. Beregningsnettets størrelse er 240x80 = 19200 celler for h/H = 0,056 og Re = 7350. CFD-resultaterne skal sammenlignes med den øverste stiplede linje som angiver målinger udført af Peter V. Nielsen [Nielsen et al., 1979]

H.5 Konklusion af CFD Benchmark 2D test

Der er foretaget stationære CFD-beregninger af isotermisk og ikke-isotermisk strømningsfelt i et ventileret rum i det kommercielle CFD-program FloVENT V9.3 ved anvendelse af $k - \varepsilon$ turbulensmodel. Der er observeret følgende hovedpunkter ved CFD Benchmark 2D testen ved isotermisk og ikke-isotermisk luftstrømning:

Analysen af den isotermiske luftstrømningstest i rummet viste en meget god korrelation mellem CFD-simuleringer og målinger af hastighedsniveauet og RMS-hastigheden i luftstrømningsfeltet i rummet. Figur H.10 på side 164 og figur H.11 på side 165 viser at CFD-bregningerne af lufthastigheden og RMS hastigheden stemmer overens med målinger i både det vertikale og

horisontale plan. Derudover viste CFD-beregningerne af luftstrålens hastighedsprofil at det var en tydelig vægstråle som fulgte loftet langt ind i rummet for derefter at ændre retning mod udsugningen. Dette strømningsfelt resulterede i to områder med stor luftrecirkulation som opstod i henholdsvis hjørnet modsat indblæsningen og hjørnet modsat udsugningen.

Analysen af den ikke-isotermiske luftstrømningstest viste flere interessante hovedpunkter i forhold til luftstrømningsfeltet i rummet ved variation af Ar-tallet. Ændringen af lufttemperaturdifferensen mellem indblæsningen og udsugningen i rummet, og dermed en forøgelse af de termiske kræfter i udtrykket for Ar-tallet, viste en tydelig reduktion af luftstrålens indtrængningslængde i rummet illustreret ved figur H.15 på side 169. Resultaterne af denne observation blev yderligere sammenlignet med målinger udført af Heiner Schwenke [Schwenke, 1974] illusteret ved figur H.14 på side 168, som viser en tydelig sammenhæng mellem luftstrålens indtrængningslængde ved forskellige Ar-tal. Derudover viste figur H.12 på side 167 at der opstår højere lufthastigheder i returstrømningen ved gulvniveau ved ikke-isotermisk strømning sammenlignet med isotermisk strømning ved figur H.9 på side 163.
CFD-SIMULERINGER AF LUFTHASTIGHEDSFORHOLD

Dette bilag viser CFD-simuleringer af hastighedsfeltet i centrum af luftstrålerne for de 10 vinduesudluftningsscenarier.



Scenarie 1. $v_0=0.79$ m/s, $T_0=11.8^{\circ}$ C $\Delta T_0=12.31^{\circ}$ C, Re=8643.34 og Ar=0.108.



Scenarie 3. $v_0=0,62$ m/s, $T_0=15,2^{\circ}C$ $\Delta T_0=10,60^{\circ}C$, Re=11248,97 og Ar=0,250.



Scenarie 2. $v_0=1,18$ m/s, $T_0=14,5^{\circ}C \Delta T_0=9,61^{\circ}C$, Re=15040,05 og Ar=0,044.



Scenarie 4. v_0 =1,37 m/s, T_0 =14,7°C ΔT_0 =11,64°C, Re=12018,01 og Ar=0,027.



Scenarie 5. v_0 =1,38 m/s, T_0 =11,8°C ΔT_0 =13,46°C, Re=12760,56 og Ar=0,033.

Figur I.1: Visualisering af lufthastighedsfeltet i køkken-alrummet for vinduesudluftningsscenarie 1,2,3,4 og 5. v_0 angiver lufthastigheden i indblæsningsåbningen, T_0 angiver indblæsningstemperaturen og ΔT_0 angiver temperaturdifferensen mellem indblæsnings- og udsugningsåbning.



Scenarie 6. $v_0=1,18$ m/s, $T_0=18^{\circ}$ C $\Delta T_0=7,86^{\circ}$ C, Re=20558,28 og Ar=0,049.



Scenarie 8. $v_0=0,56$ m/s, $T_0=17,5^{\circ}C \Delta T_0=8,91^{\circ}C$, Re=10160,36 og Ar=0,258.

Scenarie 7. $v_0=0.65$ m/s, $T_0=11.8^{\circ}$ C $\Delta T_0=11.8^{\circ}$ C, Re=11324,48 og Ar=0.237.



Scenarie 9. $v_0=0.56$ m/s, $T_0=14.6^{\circ}$ C $\Delta T_0=10.57^{\circ}$ C, Re=11280.98 og Ar=0.238.



Scenarie 10. $v_0=1,17$ m/s, $T_0=17,6^{\circ}C$ $\Delta T_0=10,25^{\circ}C$, Re=11601,80 og Ar=0,037.

Figur I.2: Visualisering af lufthastighedsfeltet i køkken-alrummet for vinduesudluftningsscenarie 6,7,8,9 og 10. v_0 angiver lufthastigheden i indblæsningsåbningen, T_0 angiver indblæsningstemperaturen og ΔT_0 angiver temperaturdifferensen mellem indblæsnings- og udsugningsåbning.



CFD-SIMULERINGER AF LUFTTEMPERATURFORHOLD

Dette bilag viser CFD-simuleringer af temperaturfeltet i centrum af luftstrålerne for de 10 vinduesudluftningsscenarier.



Scenarie 1. $v_0=0.79$ m/s, $T_0=11.8^{\circ}$ C $\Delta T_0=12.31^{\circ}$ C, Re=8643.34 og Ar=0.108.



Scenarie 3. $v_0=0,62 \text{ m/s}, T_0=15,2^{\circ}\text{C} \Delta T_0=10,60^{\circ}\text{C},$ Re=11248,97 og Ar=0,250.



Scenarie 2. $v_0=1,18$ m/s, $T_0=14,5^{\circ}C \Delta T_0=9,61^{\circ}C$, Re=15040,05 og Ar=0,044.



Scenarie 4. v_0 =1,37 m/s, T_0 =14,7°C ΔT_0 =11,64°C, Re=12018,01 og Ar=0,027.



Scenarie 5. v_0 =1,38 m/s, T_0 =11,8°C ΔT_0 =13,46°C, Re=12760,56 og Ar=0,033.

Figur J.1: Visualisering af lufttemperaturfeltet i køkken-alrummet for vinduesudluftningsscenarie 1,2,3,4 og 5. v_0 angiver lufthastigheden i indblæsningsåbningen, T_0 angiver indblæsningstemperaturen og ΔT_0 angiver temperaturdifferensen mellem indblæsnings- og udsugningsåbning.



Scenarie 6. $v_0=1,18$ m/s, $T_0=18^{\circ}$ C $\Delta T_0=7,86^{\circ}$ C, Re=20558,28 og Ar=0,049.



Scenarie 8. $v_0=0,56$ m/s, $T_0=17,5^{\circ}C \Delta T_0=8,91^{\circ}C$, Re=10160,36 og Ar=0,258.



Scenarie 7. $v_0=0,65$ m/s, $T_0=11,8^{\circ}C \Delta T_0=11,8^{\circ}C$, Re=11324,48 og Ar=0,237.



Scenarie 9. $v_0=0.56$ m/s, $T_0=14.6^{\circ}$ C $\Delta T_0=10.57^{\circ}$ C, Re=11280.98 og Ar=0.238.



 $\Delta T_0 = 10,25^{\circ}$ C, Re=11601,80 og Ar=0,037.

Figur J.2: Visualisering af lufttemperaturfeltet i køkken-alrummet for vinduesudluftningsscenarie 6,7,8,9 og 10. v_0 angiver lufthastigheden i indblæsningsåbningen, T_0 angiver indblæsningstemperaturen og ΔT_0 angiver temperaturdifferensen mellem indblæsnings- og udsugningsåbning.

CFD-SIMULERINGER AF KOMFORTNIVEAU

Dette bilag viser CFD-simuleringer af henholdsvis PMV-indekser og PPD-indeker på grænsen af køkken-alrummets opholdszone (Y=1,8 m) for de 10 vinduesudluftningsscenarier.





Scenarie 1. PMV-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).



Scenarie 3. PMV-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).

Scenarie 2. PMV-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).



Scenarie 4. PMV-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).



Scenarie 5. PMV-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).

Figur K.1: Visualisering af PMV-indeks i køkken-alrummet på grænsen af opholdszonen for vinduesudluftningsscenarie 1,2,3,4 og 5.



Scenarie 6. PMV-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).



Scenarie 8. PMV-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).

Scenarie 7. PMV-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).



Scenarie 9. PMV-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).



Scenarie 10. PMV-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).

Figur K.2: Visualisering af PMV-indeks i køkken-alrummet på grænsen af opholdszonen for vinduesudluftningsscenarie 6,7,8,9 og 10.



Scenarie 1. PPD-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).



Scenarie 3. PPD-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).

Scenarie 2. PPD-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).



Scenarie 4. PPD-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).



Scenarie 5. PPD-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).

Figur K.3: Visualisering af PPD-indeks i køkken-alrummet på grænsen af opholdszonen for vinduesudluftningsscenarie 1,2,3,4 og 5.





Scenarie 6. PPD-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).



Scenarie 8. PPD-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).

Scenarie 7. PPD-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).







Scenarie 10. PPD-indeks i XZ-planet (Y=1,8 m).

Figur K.4: Visualisering af PPD-indeks i køkken-alrummet på grænsen af opholdszonen for vinduesudluftningsscenarie 6,7,8,9 og 10.

CFD-SIMULERINGER

L.1 CFD-modellernes beregningsnet

Figur L.1 viser CFD-modellernes beregningsnet i XY-planet.



Figur L.1: CFD-modellens beregningsnet med 90x90x90 =729000 celler i XY-planet.

Figur L.2 på den følgende side viser CFD-modellernes beregningsnet i ZY-planet.



Figur L.2: CFD-modellens beregningsnet med 90x90x90 =729000 celler i ZY-planet.

Figur L.3 viser CFD-modellernes beregningsnet i XZ-planet.



Figur L.3: CFD-modellens beregningsnet med 90x90x90 =729000 celler i XZ-planet.

L.2 CFD-modellernes konvergeringsniveau

Ligning L.1 på modstående side, ligning L.2 på næste side og ligning L.3 på modstående side angiver beregningsproceduren for den numeriske simuleringsfejl i momomentumligningerne, som beskriver simuleringsfejlen i hastighedsfeltet. Samme beregningsprocedure kan laves med kontinuitetsligningen for massestrømmen, og energiligningen for temperaturfeltet. [Mentor

Graphics Corporation, 2012]

$$R_{\nu} = \sum |r_{\nu}| \tag{L.1}$$

Hvor:

 R_{v} | Totale simularingsfejl for hastigheden [-]

 r_{v} Simularingsfejlen for hastigheden i en givet net-celle [-]

I et 3D-beregningsnet udregnes simuleringsfejlen for en givet net-celle ved ligning L.2.

$$r_{\nu} = (C_0 \cdot v_0 + C_1 \cdot v_1 + C_2 \cdot v_2 + C_3 \cdot v_3 + C_4 \cdot v_4 + C_5 \cdot v_5)$$

$$-((C_0 + C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6) \cdot V)$$
(L.2)

Hvor:

 $C_0 - C_6$ Konstant i cellens naboceller [-] $v_0 - v_1$ Hastigheden i cellens naboceller [-]VKarakteristisk hastighed [m/s]

Når $r_v = 0$ er ligning L.2 opfyldt. I ligning L.3 angiver E_v simuleringsfejlen for momentumligningernes konvergeringsniveau. Konvergeringsniveauet i simuleringen er opnået når ligning L.3 er opfyldt, hvormed simuleringsprocessen stoppes. Konstanten 1 i ligningen kan ændres afhængigt af hvor lille simuleringsfejl, som accepteres i den numeriske løsningsmetode. [Mentor Graphics Corporation, 2012]

$$\frac{R_{\nu}}{E_{\nu}} < 1 \tag{L.3}$$

Hvor:

 R_v | Totale simularingsfejl for hastigheden [-]

 E_v Afslutningsfejl for hastigheden [-]

Afslutningsfejlen for hastigheden er givet ved $E_v = 0,005 \cdot \dot{M} \cdot V$, hvor \dot{M} angiver massestrømmen og V angiver den karakteristiske hastighede i en givet celle. Ligningen viser desuden at ved konvergering, accepteres en simuleringsfejl i den numeriske metode på 0,5% for hastigheden.

Figur L.4 på næste side viser grafer for simuleringsfejlen ved de anvendte variabler i strømningsligningerne i den numeriske løsningsmetode for vinduesudluftningsscenarie 5. Det ses at modellens variabler er konvergeret med undtagelse af temperaturen, som er blevet konstant ved en lav værdi. FloVENT foreskriver at simuleringsvariabler som er blevet konstant med en simuleringsfejl under 5 ikke behøver konvergere for at give stabile og valide resultater [Mentor

Graphics Corporation, 2012]. Derfor anses den lille fejl på temperaturen for acceptable og modellens simuleringsresultater kan anvendes.



Figur L.4: Simuleringsgrafer i FloVENT for vinduesudluftningsscenarie 5.

Figur L.5 på modstående side viser grafer for simuleringsfejlen ved de anvendte variabler i strømningsligningerne i den numeriske løsningsmetode for vinduesudluftningsscenarie 9. Det ses at alle modellens variabler er konvergeret, eftersom deres simuleringsfejl i den numeriske løsningsmetode er faldet til 1 eller derunder.



Figur L.5: Simuleringsgrafer i FloVENT for vinduesudluftningsscenarie 9.

TEGNINGER



Figur M.1: Plantegning af stueetage i BFL med angivelse af rumtyper og gulvareal.



Figur M.2: Plantegning af 1. sal i BFL med angivelse af rumtyper og gulvareal.



Figur M.3: Placering af testpunkter på grænsen af opholdszonen i netpunktsanalysen.



Figur M.4: Placering af personmodeller og testpunkter i netpunktsanalysen.



Figur M.5: Placering af personmodeller og testpunkter i netpunktsanalysen.



Figur M.6: Placering af testpunkter til lufttemperaturgradient i rummet. Billedet er vist fra rummets sydfacade.