



Højstrupparken

Indeklimamåling af to lejligheder
ved forskellige
ventilationsprincipper

Maj 2016



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**

Titel:

Indeklimamåling af to lejligheder ved forskellige ventilationsprincipper

Udarbejdet for:

Fyns almennyttige Boligselskab
Vestre Stationsvej 5
5000 Odense

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Gregersensvej 2
2630 Taastrup

Morten Sandholm Madsen
Asger Skød Søvsø
Søren Draborg
Energieffektivisering & Ventilation

Maj 2016

Indholdsfortegnelse

1	SAMMENFATNING	4
2	MÅLEOMFANG OG –PLAN.....	5
3	MÅLESITE	6
3.1	YRSAVEJ 18 1. TH	6
3.2	HØJSTRUPVEJ 42, ST. TV	8
3.3	VENTILATIONSANLÆGGENE	10
4	MÅLERESULTATER	10
4.1	MÅLING AF LUFTMÆNGDER	10
4.2	LYDTRANSMISSION	10
4.3	TÆTHEDSPRØVNING	13
4.4	MÅLING AF TEMPERATUR, CO ₂ OG FUGT I LEJLIGHEDEN PÅ YRSAVEJ	13
4.4.1	Temperatur.....	14
4.4.2	CO ₂	16
4.4.3	Fugt.....	18
4.5	MÅLING AF TEMPERATUR, CO ₂ OG FUGT I LEJLIGHEDEN PÅ HØJSTRUPVEJ	19
4.5.1	Temperatur.....	19
4.5.2	CO ₂	22
4.5.3	Fugt.....	24
4.6	MÅLING AF TRÆK.....	26
4.6.1	Yrsavej	26
4.6.2	Højstrupvej	28
4.7	MÅLING AF ENERGIFORBRUG.....	30
4.8	TOTALØKONOMISK ANALYSE.....	32
	REFERENCER	34
	BILAG – STATISTISK ANALYSE.....	35
	BILAG – LYDMÅLINGER.....	35
	BILAG – NOTAT VEDR. BYGNINGSAKUSTISKE FORHOLD.....	35

1 Sammenfatning

Fyns almennyttige Boligselskab har bedt Teknologisk Institut om, at være behjælpelig med at forestå ventilationstekniske målinger med henblik på at bestemme om de nuværende ventilationsforhold overholder de i Bygningsreglementet fastsatte bestemmelser omkring minimumsluftmængder. Dette er indeholdt i en tidligere rapport "Højstrupparken – Gennemgang af ventilation og bygningskonstruktion" fra maj 2015. Derudover er det ønsket belyst om renoveringen af to udvalgte demonstrationslejligheder har medført en lavere utæthed i klimaskærmen samt lavere lydtransmission igennem gulvdækket. Udtræk herom er medtaget i nærværende rapport. Resultaterne sammenholdes med målinger foretaget i identiske lejligheder før renovering.

Udover de indledende målinger foretaget før sommeren 2015 har Fyns almennyttige Boligselskab bedt Teknologisk Institut om at forestå længerevarende indeklimasimuleringer og –målinger i samme to demonstrationslejligheder med henblik på at afprøve forskellige ventilationsprincipper. Der er både foretaget simulering og målinger ved brug af et behovstyret balanceret ventilationsanlæg og mekanisk udsugning kombineret med ventilationsvinduer. I forbindelse med målingerne er temperaturen, CO₂ koncentration, den relative fugtighed og energiforbruget til opvarmning blevet logget. Målingerne har fundet sted i perioden fra d. 3 august 2015 til d. 1 maj 2016.

De indledende undersøgelser har vist, at:

- Halvdelen af de undersøgte lejligheder har en tilstrækkelig luftlydisolation i etagedækket. De resterende overholder ikke kravene. Erfaringer viser, at det bør være muligt at opnå en bedre isolation
- Ingen af de undersøgte lejligheder overholder kravet omkring trinlydniveau. Erfaringer viser, at det bør være muligt at reducere trinlydniveauet væsentligt
- Tre af de undersøgte lejligheder (en renoveret og to ikke renoverede) består kravet med hensyn til utæthed i klimaskærmen. Den sidste lejlighed (Yrsavej) har en højere utæthed end, hvad BR10 tillader
- Der flere steder er konstateret kuldebroer, både i de ikke renoverede og renoverede lejligheder.

De længerevarende indeklimateundersøgelser har vist, at:

- Rumtemperaturen i lejligheden på Yrsavej er inden for indeklimaklasse B ved begge ventilationsprincipper
- Rumtemperaturen i lejligheden på Højstrupvej er generelt uden for det anbefalede jf. standarden DS 1752. Dette vil dog ændre sig ved indflytning af beboer
- Det atmosfæriske indeklima befinder sig generelt inden for indeklimaklasse B for begge ventilationsprincipper. Dette gør sig gældende for begge demonstrationslejligheder med hensyn til CO₂ koncentrationen og den relative fugtighed
- Trækmålingerne foretaget ved brug af ventilationsvinduerne viser, at der i opholdszonen (60 cm fra ydervæg) ikke vil forekomme trækgener ved en temperaturforskel på 20°C mellem inde og ude. Den gennemsnitlige værdi for DR er omkring 5%, hvilket er væsentligt bedre end, hvad indeklimaklasse A foreskriver.
- Målingerne indikerer, at demonstrationslejlighedernes energiforbrug er mindst i de perioder, hvor den balancerede ventilation har været anvendt. Dette resultat er dog behæftet med store usikkerheder.
- Energiforbruget er større ved ventilationsvinduet, sammenlignet med det balancerede ventilationsanlæg.

- Totaløkonomisk er anskaffelsesprisen den afgørende faktor. Forskellene i energiforbrug, er for små til at gøre en afgørende forskel.

På baggrund af målingerne af energiforbruget og inde- og udetemperaturen er der foretaget en statistisk beregningsmodel af energiforbruget i forhold til det respektive ventilationsprincip. Denne model er som beskrevet behæftet med store usikkerheder. En af de markante usikkerheder er at ventilerne i vinduerne kun kan lukkes til 40% og varmetabet eller -tilførslen mellem demonstrationslejlighederne og de omkringliggende lejligheder. Dette kan have stor indflydelse på målingerne. I realiteten burde rumtemperaturerne i de omkringliggende lejligheder være blevet målt for herved at mindske usikkerheden. Det bør yderligere undersøges, hvad varmegenvindingseffektiviteten er for de decentrale balancerede ventilationsanlæg, eftersom energiforbruget til opvarmning er afhængig af effektiviteten af varmeveksleren. Som udgangspunkt kan producentens data benyttes herom. Det ses dog sommetider, at data givet fra producenten ikke altid stemmer overens med målinger.

Ventilationsvinduet partikelfiltrering bør undersøges, eftersom der i almindelige beboelses ventilationsanlæg er indsat et F7 filter, som filtrerer de værste partikler væk, såsom bilos og pollen. Ved højttrafikerede veje er dette endnu vigtigere. Dertil bør ventilationsvinduets evne til at støjdampe undersøges.

2 Måleomfang og –plan

Inden de længerevarende målinger påbegyndes er der foretaget tæthedsprøvninger af de to demonstrationslejligheder inklusiv to andre lignende lejligheder, som ikke har gennemgået en større renovering. Der er tilsvarende foretaget målinger af lydtransmissionen mellem demonstrationslejlighederne og de underliggende lejligheder.

Indeklimamålingerne er påbegyndt d. 3 august 2015 og afsluttet d. 1 maj 2016. Dette for at opnå data for indeklimaet og energiforbruget til opvarmning, som er repræsentativ for et helt kalender år. Sæsonerne er inddelt i en sommerperiode, forår/efterårsperiode og vinterperiode. I alle tre sæsoner varieres ventilationsprincippet. Mere om dette findes i afsnit 3.3 Ventilationsanlæggene.

Sommerperiode

I sommerperioden er målingerne fokuseret på indeklimaet, eftersom energiforbruget til opvarmning i denne periode er begrænset.

Der foretages følgende målinger:

- Kontrolmåling af ventilationsluftmængderne (grundventilation svarende til 0,5 gange i timen) ved begge ventilationsprincipper
- Måling af indeklima herunder temperaturer, fugt og CO₂ kontinuerligt i hvert beboelsesrum

Forår/efterårsperiode

I forår- og efterårsperioden foretages følgende målinger:

- Måling af indeklima herunder temperaturer, fugt og CO₂ kontinuerligt i hvert beboelsesrum
- Måling af varmekonsum fra hvert opholdsrum ved måling af elektrisk effekt fra el-radiatorer.

Vinterperiode

I vinterperioden foretages følgende målinger:

- Måling af indeklima herunder temperaturer, fugt og CO₂ kontinuerligt i hvert beboelsesrum
- Måling af varmekonsum fra hvert opholdsrum ved måling af elektrisk effekt fra el-radiatorer
- Måling af træk (øjebliksværdier) fra friskluftsventiler.

3 Målesite

3.1 Yrsavej 18 1. th

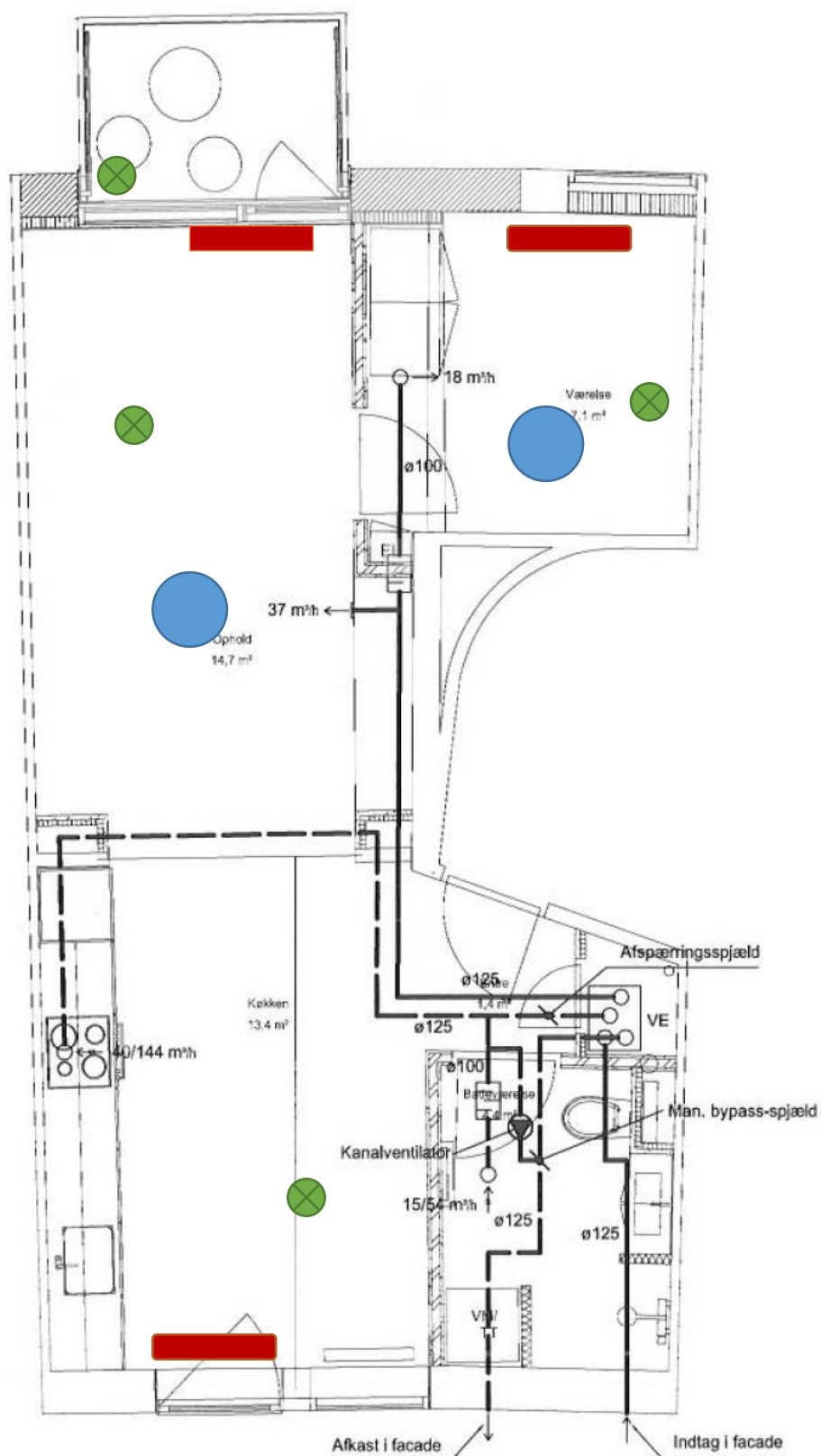
Lejligheden på Yrsavej består af to opholdsrum, et wc og bad og et køkken med et samlet boligareal på 43,5 m². Rumhøjden er i gennemsnit lige under 2,4 m. Dette giver en samlet lejlighedsvolumen på ca. 103 m³.

Til den længerevarende simulering og måling af indeklimaet er der anvendt to personsimulatorer, som hver afgiver 100 W varme, 20 g/h fugt og 40 l/h CO₂, hvilket omtrentligt svarer til afgivelsen fra en stillesiddende person. Personsimulatorerne er angivet på nedenstående figur med en blå cirkel.

Radiatorerne koblet til fjernvarmenettet anvendes ikke til at afgive varme i opvarmningssæsonen. I stedet anvendes opsatte el-radiatorer, således det er muligt at måle en mere nøjagtig varmeafgivelse fra radiatorerne. Der er i alt opsat tre el-radiatorer i lejligheden. Disse er angivet på nedenstående figur med en rød firkant.

Til måling af indeklimaet anvendes tre indeklimaloggere (IC-meter) fordelt i hvert opholdsrum. Indeklimaloggerne måler temperatur, CO₂, fugt og støj. For at kende udekonditionerne placeres endnu en logger på altanen. Denne logger anvendes ligeledes for lejligheden på Højstrupvej. Indeklimaloggerne er angivet på nedenstående figur med en grøn cirkel.

Til måling af energiforbruget til el-radiatorer og det balancerede ventilationsanlæg anvendes en eller flere elmålere. Formålet med at måle elforbruget på ventilationsanlægget er, at det derudfra er muligt at vurdere driften af anlægget. Dette er relevant, eftersom anlægget er behovsstyret, hvorved luftmængderne løbende kan ændres. Målingerne i indeværende projekt har dog vist, at grundet den konstante tilførsel af fugt og CO₂ kører ventilationsanlægget stort set i samme driftspunkt.



Figur 3.1 Oversigtstegning af lejligheden på Yrsavej, hvor måleudstyr og placering er indtegnet. Tegningen er vejledende.

3.2 Højstrupvej 42, st. tv

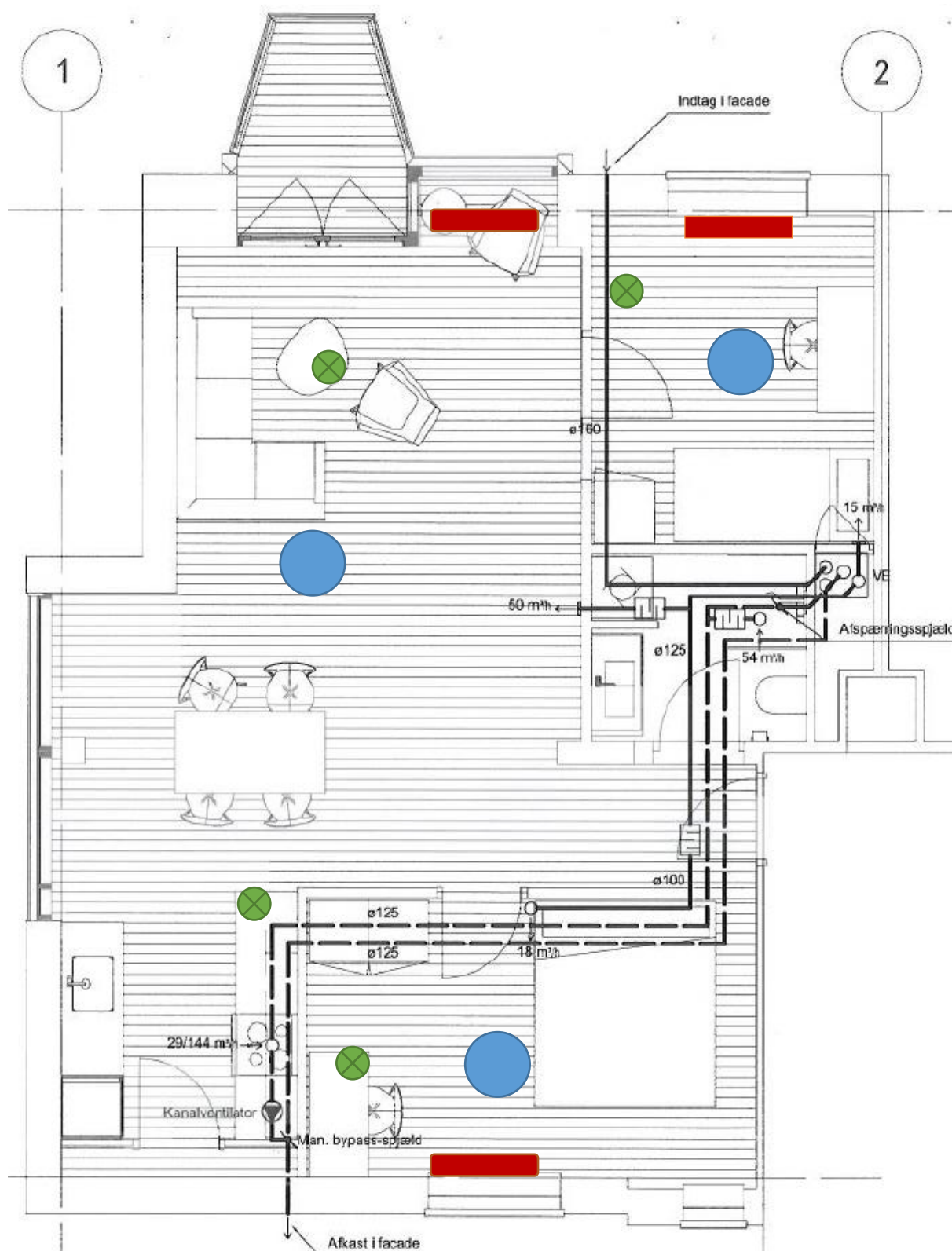
Lejligheden på Højstrupvej består af tre opholdsrum, et wc og bad og et køkken med et samlet boligareal på 66 m². Rumhøjden er i gennemsnit lige under 2,6 m. Dette giver en samlet lejlighedsvolumen på ca. 171 m³.

Til den længerevarende simulering og måling af indeklimaet er der anvendt tre personsimulatorer, som hver afgiver 100 W varme, 20 g/h fugt og 40 l/h CO₂, hvilket omtrentligt svarer til afgivelsen fra en stillesiddende person. Personsimulatorerne er angivet på nedenstående figur med en blå cirkel.

Radiatorerne koblet til fjernvarmenettet anvendes ikke til at afgive varme i opvarmningssæsonen. I stedet anvendes opsatte el-radiatorer, således det er muligt at måle en mere nøjagtig varmeafgivelse fra radiatorerne. Der er i alt opsat tre el-radiatorer i lejligheden. Disse er angivet på nedenstående figur med en rød firkant.

Til måling af indeklimaet anvendes fire indeklimaloggere (IC-meter) fordelt i hvert opholdsrum. Indeklimaloggerne måler temperatur, CO₂, fugt og støj. For at kende udekonditionerne anvendes data fra loggeren placeret på altanen i lejligheden på Yrsavej. Indeklimaloggerne er angivet på nedenstående figur med en grøn cirkel.

Til måling af energiforbruget til el-radiatorer og det balancerede ventilationsanlæg anvendes en eller flere elmålere. Formålet med at måle elforbruget på ventilationsanlægget er, at det derudfra er muligt at vurdere driften af anlægget. Dette er relevant, eftersom anlægget er behovsstyret, hvorved luftmængderne løbende kan ændres. Målingerne i indeværende projekt har dog vist, at grundet den konstante tilførsel af fugt og CO₂ kører ventilationsanlægget stort set i samme driftspunkt.



Figur 3.2 Oversigtstegning af lejligheden på Højstrupvej, hvor måleudstyr og placering er indtegnet. Tegningen er vejledende.

3.3 Ventilationsanlæggene

I de to demonstrationslejligheder foretages luftudskiftningen ved skiftevis at benytte et af to ventilationsprincipper.

Det ene ventilationsprincip benytter et decentralt placeret behovstyret ventilationsanlæg i lejlighederne, hvor der er etableret indblæsningsarmaturer i opholdsrummene og udsugningskontrolventiler i wc- og badeværelset. Udsugningen i køkkenet sker igennem emhætten som er koblet til det decentrale anlæg. De decentrale ventilationsanlæg er mekaniske balancerede ventilationsanlæg, dvs. at de både tilfører og udsuger luft fra lejlighederne, hvorved en stor del af den udsugede varme varmegenvindes i anlægget. De decentrale ventilationsanlæg er placeret i et teknikskab i begge lejligheder.

Det andet ventilationsprincip benytter en udsugningsventilator placeret over nedhængt loft i hhv. badeværelset i lejligheden på Yrsavej og i soveværelset i lejligheden på Højstrupvej. Udsugningsventilatoren udsuger luft fra køkkenet igennem emhætten og fra badeværelset igennem en udsugningskontrolventil. Friskluften tilføres gennem én eller flere friskluftsventiler placeret i hvert opholdsrum i ventilationsvinduerne.

Ventilationsprincipperne som er indbygget i samme ventilationssystem benyttes skiftevis til ventilering af lejlighederne. Dette sker ved at ændre spjældindstillingerne i systemet, lukke eller åbne friskluftsventilerne samtidigt med at slukke et af to anlæg.

4 Måleresultater

4.1 Måling af luftmængder

Før påbegyndelse af de længerevarende indeklimamålinger blev luftmængderne målt. Disse målinger er yderligere beskrevet i rapporten "Højstrupparken – Gennemgang af ventilation og bygningskonstruktion" fra maj 2015. Efter fornyet indregulering af ventilationsanlæggene er der foretaget målinger af luftmængder igen. Målingerne er foretaget for begge ventilationsprincipper. Eftersom de balancerede ventilationsanlæg er behovstyret opmåles luftmængderne for disse anlæg i flere trin.

De mekaniske udsugninger er indreguleret til at levere et luftskifte i begge demonstrationslejligheder svarende til en $0,5^{-1}h$.

De balancerede ventilationsanlæg er indreguleret til at levere et luftskifte i begge demonstrationslejligheder svarende til en $0,5^{-1}h$, når anlægget vel og mærket kører i forceret drift. Ved almindelig drift tilpasses luftmængderne automatisk ift. belastningen i lejlighederne i form af fugt.

Luftmålingerne er udført med en TSI Velocicalc, der er monteret i en Alnor GGA45 tragt. Denne måling er meget præcis, men der gøres opmærksom på, at målingerne er øjebliksværdier, der er målt under besigtigelsen. Der er foretaget målinger af udsugningsluftmængderne i køkkenerne (emhætterne) og på badeværelserne (kontrolventilerne). Derudover er der foretaget målinger af indblæsningsluftmængderne i opholdsrummene.

4.2 Lydtransmission

Lydmålingerne som omfatter måling af luftlydisolation og trinlydniveau mellem lejligheder i vertikal retning er udført i henhold til DS/EN ISO 140-4 og DS/EN ISO 140-7. Målingerne

vedrørende luftlydisolationen er udført med en Norsonic NOR280 og NOR276, NTi Audio XL2 og mikrofon M2210. Se figur 3



Figur 4.1 Måleopstilling ved måling af luftlydisolation.

Målingerne udføres ved, at lydniveauet først måles i det pågældende rum, når højttaler M2210 afgiver omkring 110 dB. Dernæst måles lydniveauet igen i den underliggende lejlighed. Under forsøget placeres lydkilden i to positioner og lydniveauet måles i 5 positioner. Herefter kan luftlydisolationen beregnes.

Målingerne vedrørende trinlydniveauet er udført med en Norsonic NOR277, NTi Audio XL2 og mikrofon M2210. Se nedenstående figur.



Figur 4.2 Måleopstilling ved måling af trinlydniveau.

Målingerne udføres ved, at Norsonic NOR277 (simulering af trin) aktiveres, hvorefter trinlydniveauet måles i den underliggende lejlighed. Norsonic NOR277 placeres i 4 positioner fordelt jævnt over gulvarealet imens trinlydniveauet måles.

Resultaterne af måling af luftlydisolation og trinlydniveau mellem lejligheder i vertikal retning er angivet i nedenstående tabel 1. Minimumskravet til luftlydisolationen ($R'w$) er $55 \text{ dB} \pm 1 \text{ dB}$. Det vil sige, at hvis den målte værdi er lavere end dette, så overholder den pågældende bygningsdel ikke kravet. Maksimumskravet til trinlydniveauet ($L'_{n,w}$) er $53 \text{ dB} \pm 1 \text{ dB}$. Det vil sige, at såfremt den målte værdi er højere end dette, så overholder den pågældende bygningsdel ikke kravet.

Afsender adresse	Renoveret/eksisterende forhold	Modtager adresse	Luftlyd [dB]	Krav [dB]	Trinlyd [dB]	Krav [dB]
Højstrupvej 42 st. tv stue	Renoveret etageadskillelse	Højstrupvej 42 kld. tv. Depotrum 1	55	55 ± 1	65	53 ± 1
Højstrupvej 42 st. tv værelse	Renoveret etageadskillelse	Højstrupvej 42 kld. tv. Depotrum 2	54	55 ± 1	57	53 ± 1
Højstrupvej 42 1. tv	Eksisterende etageadskillelse	Højstrupvej 42 st. tv	50	55 ± 1	63	53 ± 1
Yrsavej 18 1. th	Renoveret etageadskillelse	Yrsavej 18 st. th	52	55 ± 1	64	53 ± 1

Tabel 4.4.2.1 Luftlydisolation og trinlydniveau. (Værdier med grønt = kravet overholdt)

Som det ses ud fra resultaterne angivet i ovenstående tabel er luftlydisolationen mellem stuelejligheden på Højstrupvej og kælderrummet tilstrækkelig dæmpende. Det bør dog bemærkes, at kælderdekke sandsynligvis ikke afspejler etagedækkene i den resterende del af bygningen. Luftlydisolationen er hverken tilstrækkelig mellem Højstrupvej 42, 1. tv. og Højstrupvej 42, st. tv. eller mellem Yrsavej 18, 1. th. og Yrsavej 18, st. th.

Med hensyn til trinlydniveauet er der ingen af de undersøgte lejligheder som overholder kravet.

Erfaringer fra andre byggerier fra omkring 1940'erne viser, at det er muligt at opnå en dæmpning af luftlyden op til 60 dB og samtidigt reducere trinlydniveauet til omkring 40 dB.

Yderligere information herom kan findes i rapporten "Højstrupparken – Gennemgang af ventilation og bygningskonstruktion" fra maj 2015.

4.3 Tæthedsprøvning

Lækagetesten er udført efter norm EN13829. Testen er udført med udstyr fra Retrotec. Trykmåleren er af typen DM-2 og ventilatoren af typen 2000. Testen udføres ved at måle den mængde luft som siver ind i lejligheden ved et undertryk på 50 Pa. Under testen er alle ventilationsarmaturer, afløb og emhætter tapet til og alle vinduer lukket. Ved denne metode undersøges kun på uhensigtsmæssige utætheder. Testen er udført 22. maj 2015.

Resultaterne af tæthedsprøvningen er angivet i nedenstående tabel. Maksimumskravet fra BR10 er 1,5 l/s/m² for nye bygninger. Det ses, at kun Yrsavej 18 1. tv ikke lever op til det nye krav i Bygningsreglementet. Tæthedskravet i Bygningsreglementet er dog først blevet indført i 2006, Højstrupparken er derfor ikke omfattet af det.

	Nettoareal [m ²]	BR10 krav [l/s/m ²]	Resultat [l/s/m ²]	Usikkerhed pga. vind [%]
Højstrupvej 42 st tv	66,7	1,50	1,41	+/-2,1
Højstrupvej 42 1. tv	66,7	1,50	1,50	+/-0,5
Møllemarksvej 46 2. th	43,5	1,50	1,41	+/-1,0
Yrsavej 18 1. th	43,5	1,50	2,00	+/-1,0

Tabel 4.4.3.1

Flow ved 50 Pa per m² boligareal.

De to lejligheder på Højstrupvej var identiske inden renovering af lejligheden i stuen. Det ses, at Højstrupvej 42, st. tv (renoveret) har en utæthed, der er 6 % mindre end Højstrupvej 42, 1. tv (ikke renoveret). Det kan dog ikke med sikkerhed siges om dette kan tilskrives renoveringen.

Ligeledes er lejlighederne på Møllemarksvej og Yrsavej ens. Her er det lejligheden på Yrsavej, som er renoveret. Det ses, at utætheden for Yrsavej er 42 % højere end den for Møllemarksvej. Det blev fundet, at der under terrassedøren i køkkenet/stuen var en utæthed ved gulvpanelet. Dette kan ses på termografibillederne. Utætheden var tydelig mærkbar og er en del af forklaringen på den højere utæthed.

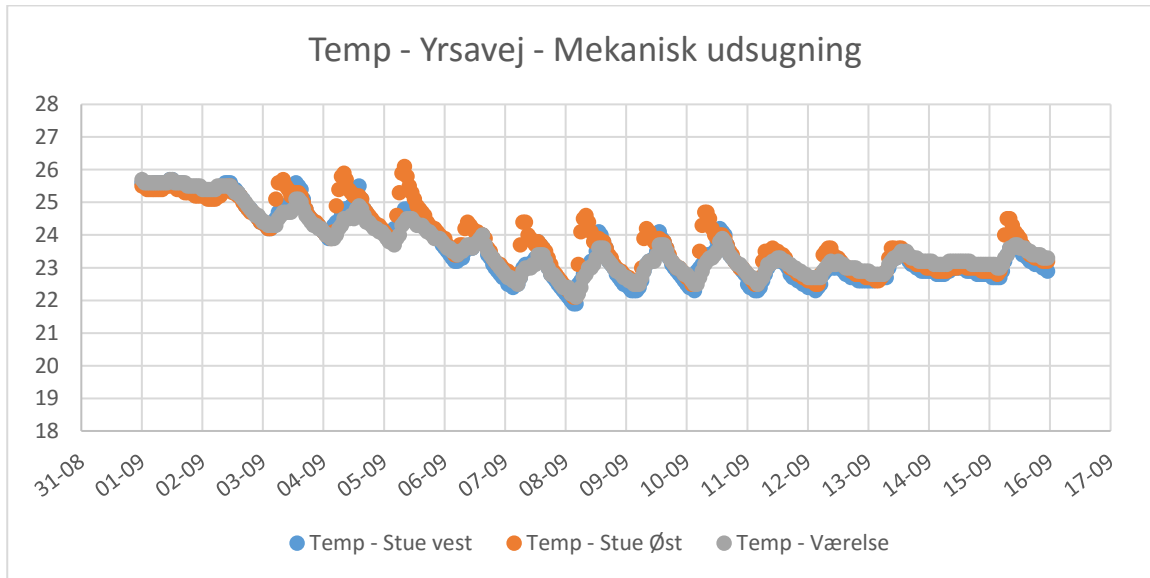
Yderligere information herom kan findes i rapporten "Højstrupparken – Gennemgang af ventilation og bygningskonstruktion" fra maj 2015.

4.4 Måling af temperatur, CO₂ og fugt i lejligheden på Yrsavej

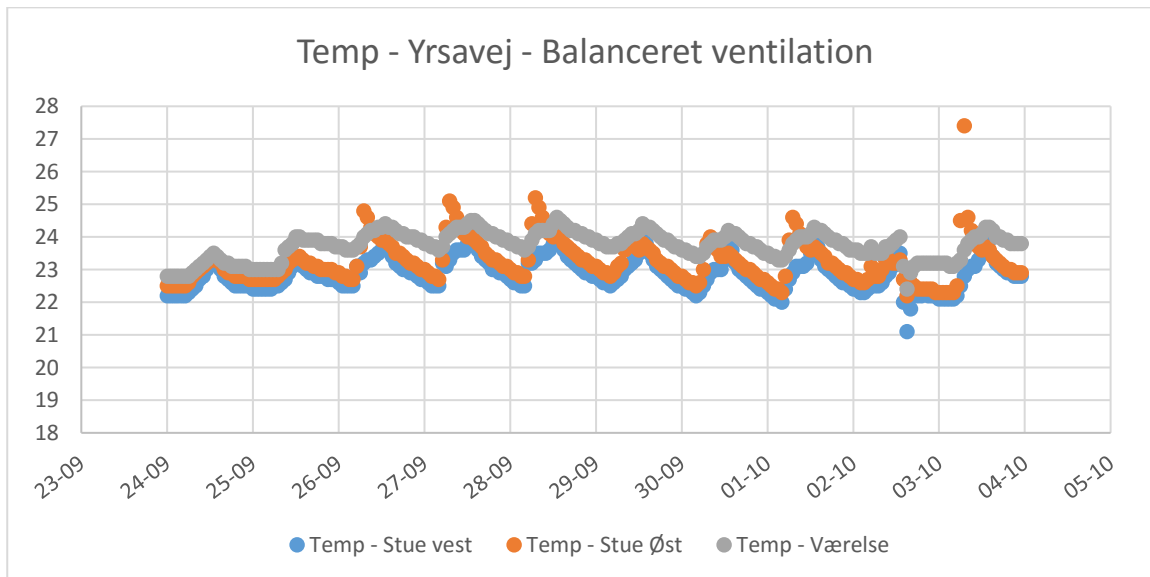
Som tidligere beskrevet er der foretaget målinger i tre sæsoner. I disse sæsoner varieres ventilationsprincippet mellem behovstyret ventilation og mekanisk udsugning. Der er desuden foretaget et sæt ekstra målinger, hvor den behovstyrede ventilation er forceret for at opnå et luftskifte på 0,5 h⁻¹ for at øge sammenligningsgrundlaget mellem ventilationsprincipperne.

4.4.1 Temperatur

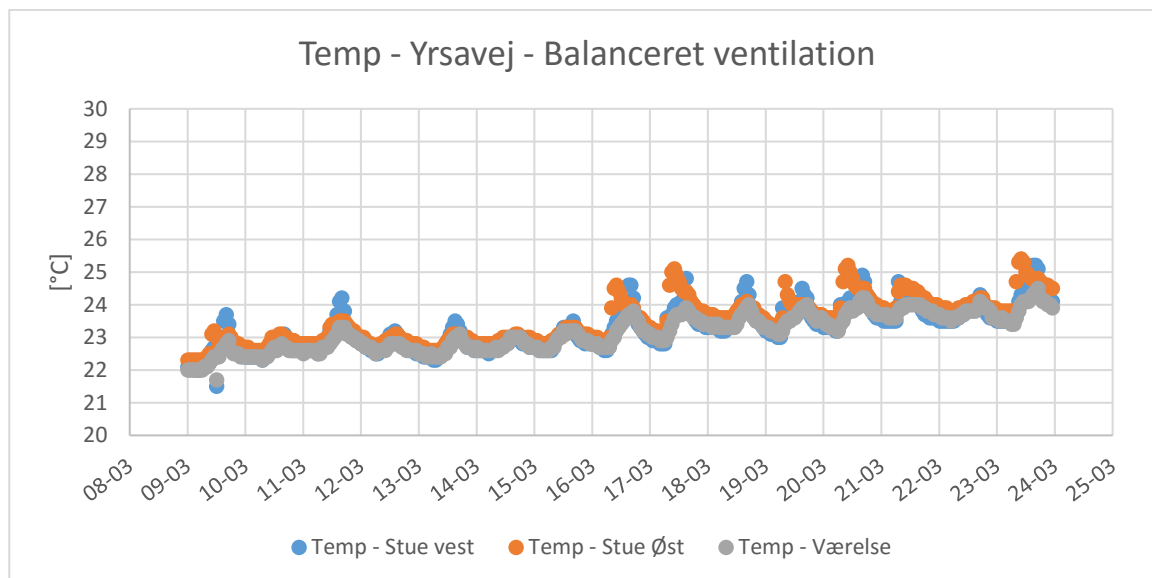
Temperaturen er målt i tre scenarier; ved forceret ventilation, balanceret ventilation og mekanisk udsugning. Ved alle ventilationsprincipperne har luftskiftet ca. været $0,5^{-1}h$. Det er valgt at vise en måleperiode fra om sommeren/efteråret og en om vinteren. Forskellen mellem måleperioderne er, at der i sommerperioden ikke er indsat radiatorer. Herved kan de aktuelle temperaturprofiler som forekom i lejligheden om sommeren ses.



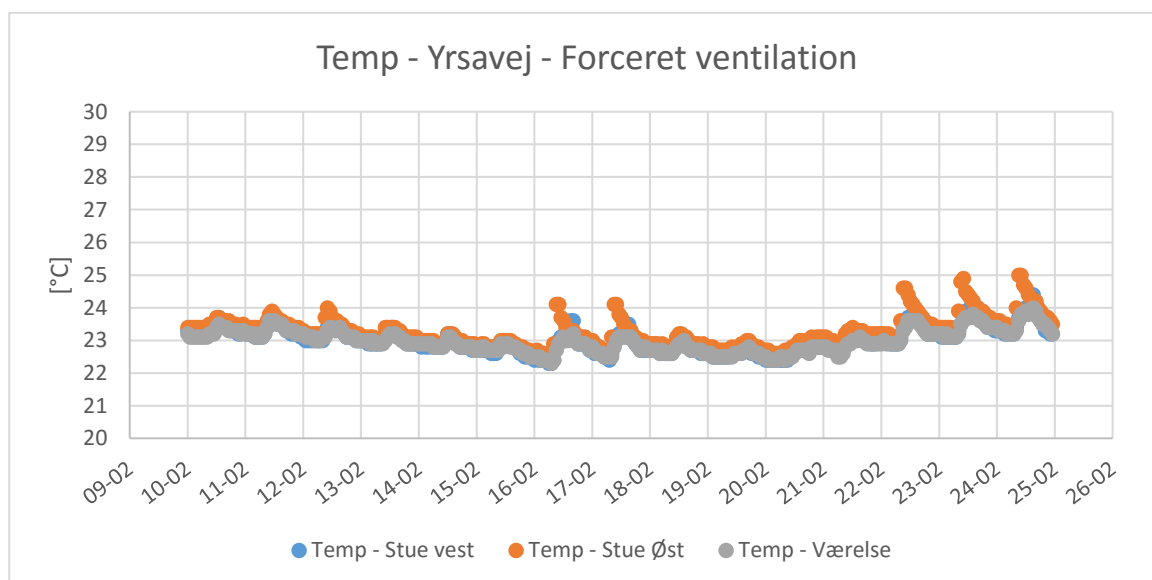
Figur 4.3 Temperaturen ved mekanisk udsugning i sommerperioden.



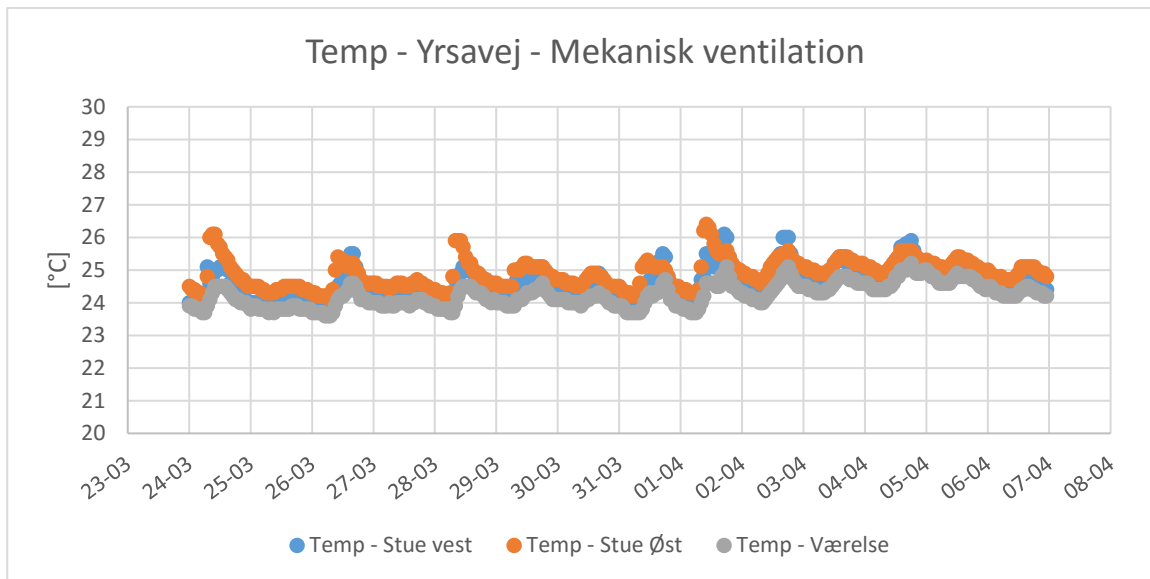
Figur 4.4 Temperaturen ved balanceret ventilation i sommerperioden.



Figur 4.5 Temperaturen ved balanceret ventilation i vinterperioden.



Figur 4.6 Temperaturen ved forceret ventilation i vinterperioden.



Figur 4.7 Temperaturen ved mekanisk udsugning i vinterperioden.

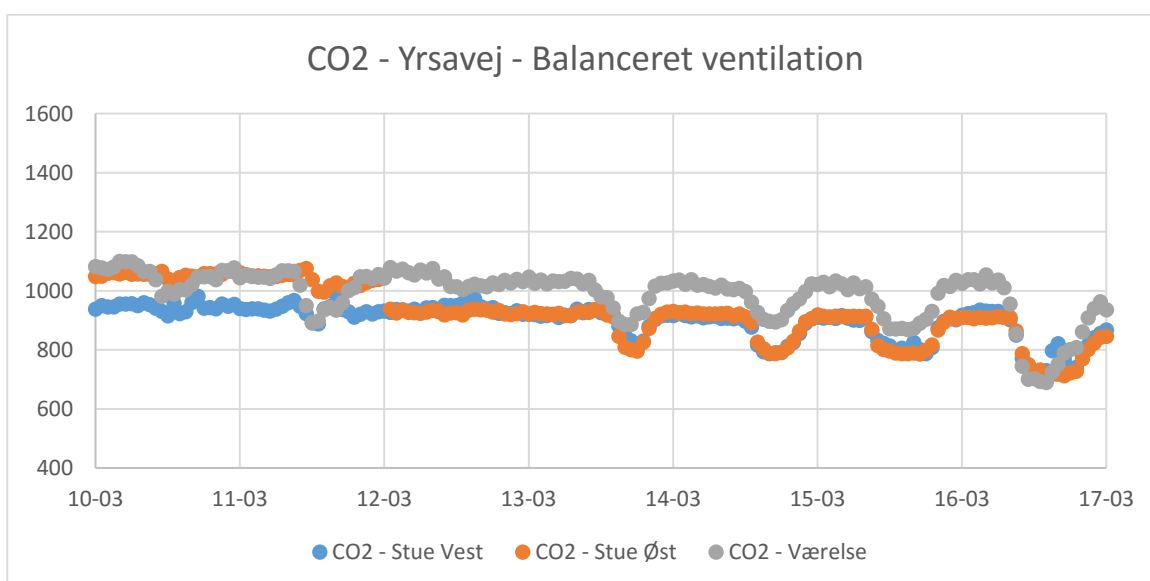
Opsummering:

Temperaturerne i lejligheden i sommerperioden befinder sig ved begge ventilationsprincipper i indeklimaklasse B, som tillader en temperatur på $24,5 \pm 1,5^\circ\text{C}$.

Temperaturerne som er angivet ovenfor for vinterperioden kan ikke som enkeltstående data anvendes til at vurdere på indeklimaet. Dette skyldes, at der i lejligheden er opsat el-radiatorer, som er indstillet til at levere en højere effekt end almindeligt, eftersom der derved opnås en bedre målenøjagtighed på elforbruget til el-radiatorerne. Temperaturniveauet skal derfor udelukkende anvendes til videre analyse af energiforbruget.

4.4.2 CO₂

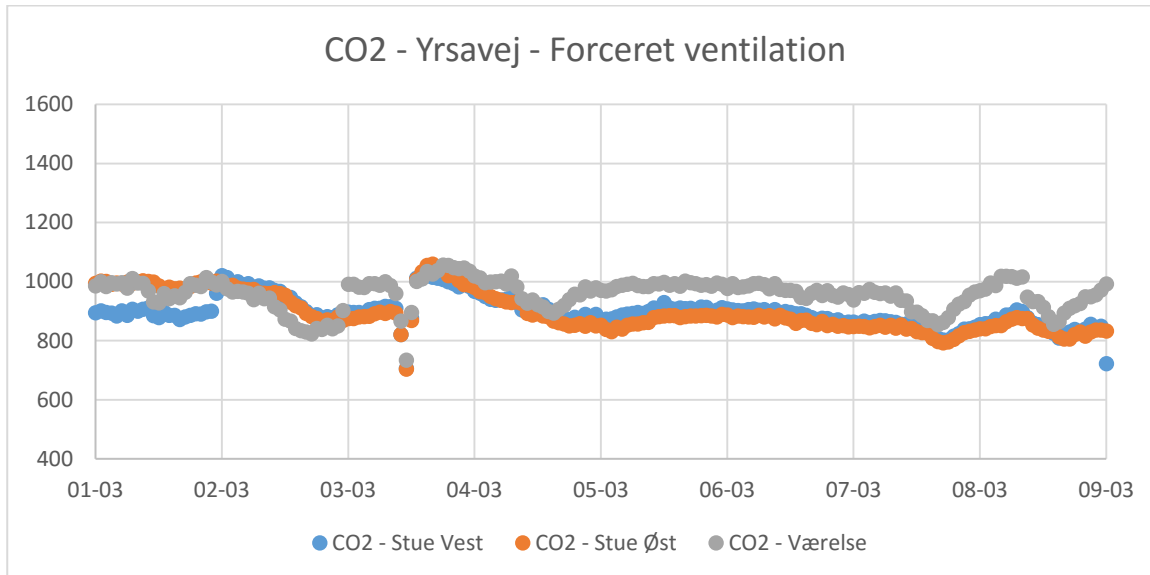
CO₂ koncentrationen er målt i tre scenarier; ved forceret ventilation, balanceret ventilation og mekanisk udsugning. Ved alle ventilationsprincipperne har luftskiftet ca. været $0,5^{-1}\text{h}$.



Figur 4.8 CO₂ koncentration ved balanceret ventilation.

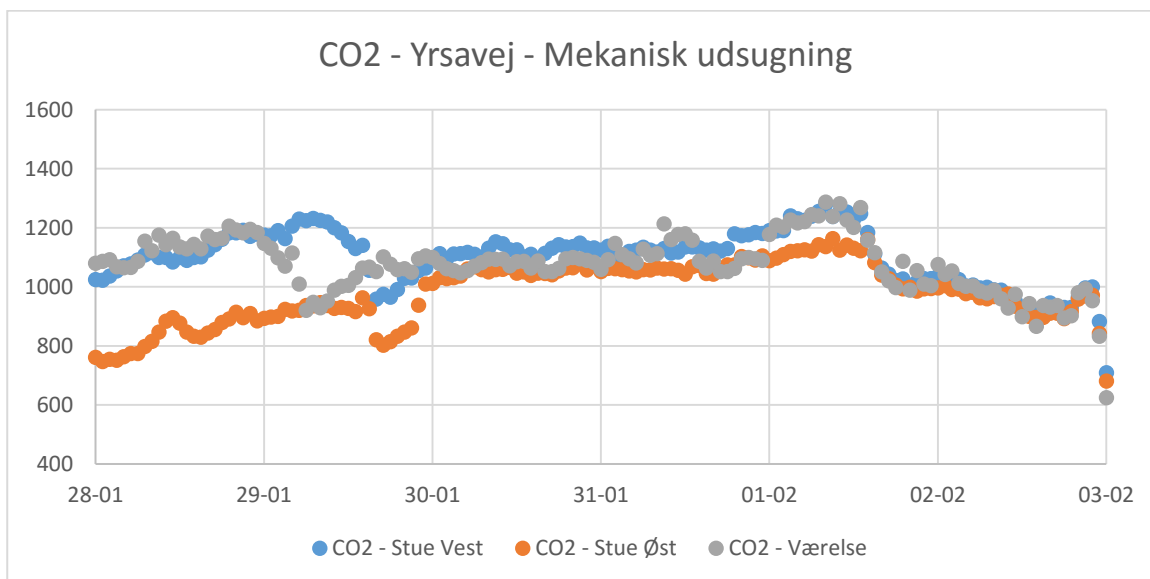
Som det fremgår af ovenstående figur forekommer der en variation af CO₂ koncentrationen over dagen. Dette skyldes, at ventilationsanlægget løbende regulerer luftmængderne. Middelkoncentration er i den udvalgte periode ca. 940 ppm. I den danske standard for indeklima DS1752 opfattes en CO₂ koncentrationen på op til 1.000 ppm som generelt acceptabel, og hvis CO₂ koncentrationen er under 800 ppm er luftkvaliteten meget fin.

Forceret ventilation angiver blot, at det balancerede ventilationsanlæg er sat i en konstant forceret drift, hvor luftskiftet svarer til 0,5⁻¹h.



Figur 4.9 CO₂ koncentration ved forceret ventilation.

Som det fremgår af ovenstående figur forekommer der generelt en mindre variation i CO₂ koncentrationen end ved den balanceret ventilation. Dette skyldes, at ventilationsanlægget kører i samme driftspunkt. Middelkoncentration er i den udvalgte periode ca. 910 ppm, hvilket svarer til en indeklimaklasse B.



Figur 4.10 CO₂ koncentration ved mekanisk udsugning.

Som det fremgår af ovenstående figur forekommer der en variation i CO₂ koncentrationen over perioden. Dette skyldes doseringsmetoden og doseringslængden. Det har således kun været muligt at dosere gas (CO₂) i ca. 7 dage afhængig af den aktuelle indstilling på doseringsdyserne. Derfor ses en mindre stigning i starten af perioden og en større aftagning i slutningen af perioden. Den mekaniske udsugning har kørt i samme driftspunkt i hele perioden. Middelkoncentration er i den udvalgte periode ca. 1050 ppm, hvilket svarer til en indeklimaklasse C.

Opsummering:

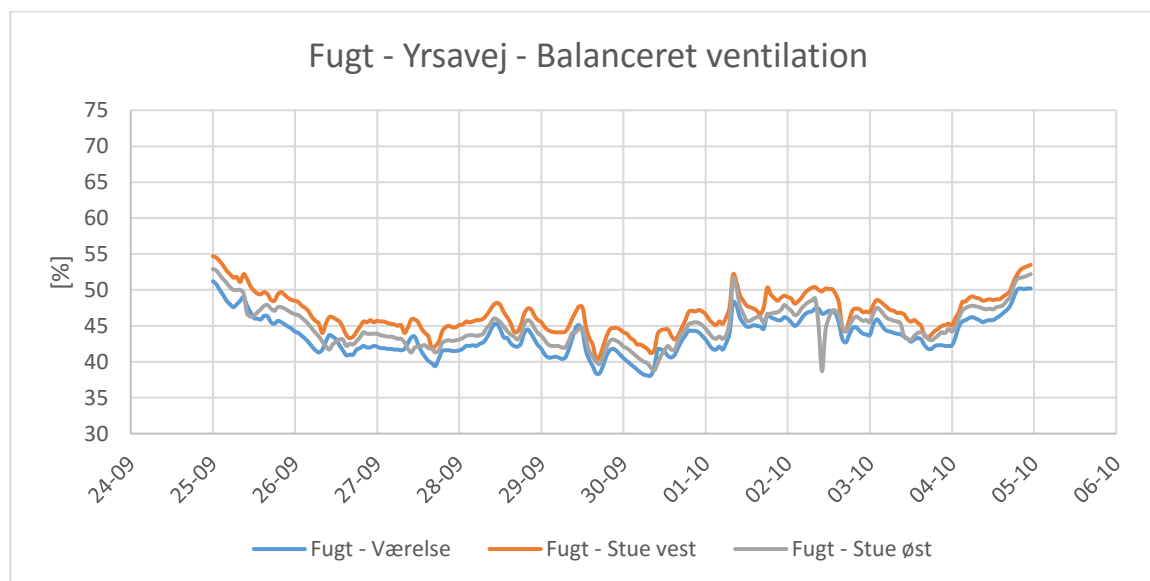
Ved alle ventilationsprincipper ses det af ovenstående figurer, at der generelt forekommer en god luftopblanding i lejligheden, eftersom CO₂ koncentrationen stort set er identisk i alle tre målepunkter.

CO₂ koncentrationen ved brug af mekanisk udsugning og ventilationsvinduerne er en smule højere end ved brug af det balanceret ventilationsanlæg. Differensen er dog ikke stor nok til, at der med en vis sandsynlighed kan konstateres, at det ene ventilationsprincip performer bedre end det andet, når en række usikkerheder tages i betragtning.

De viste målinger er repræsentative for de tre sæsoner.

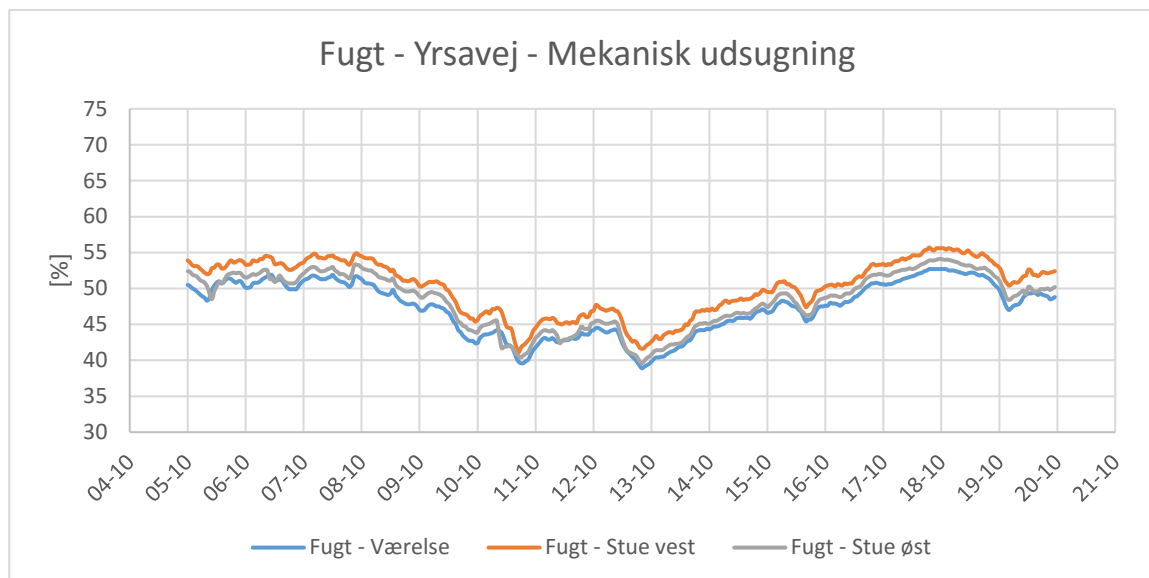
4.4.3 Fugt

Den relative fugtighed er målt i tre scenarier; ved forceret ventilation, balanceret ventilation og mekanisk udsugning. Ved alle ventilationsprincipperne har luftskiftet ca. været 0,5⁻¹h.



Figur 4.11 Den relative fugtighed balanceret ventilation.

Som det fremgår af ovenstående figur forekommer der en løbende variation i den relative fugtighed i den udvalgte måleperiode. Dette skyldes primært udekonditionerne og at ventilationsanlægget løbende regulerer luftmængderne. Middelværdien er i den udvalgte periode ca. 46 %. Ifølge den danske standard for indeklima DS15251 befinder værdien sig inden for indeklimaklasse A, som tillader en relativ fugtighed mellem 30-50 %.



Figur 4.12 Den relative fugtighed mekanisk udsugning.

Som det fremgår af ovenstående figur forekommer der en løbende variation i den relative fugtighed i den udvalgte måleperiode. Dette skyldes udekonditionerne. Middelværdien er i den udvalgte periode ca. 48 %, hvilket er inden for indeklimaklasse A.

Opsummering:

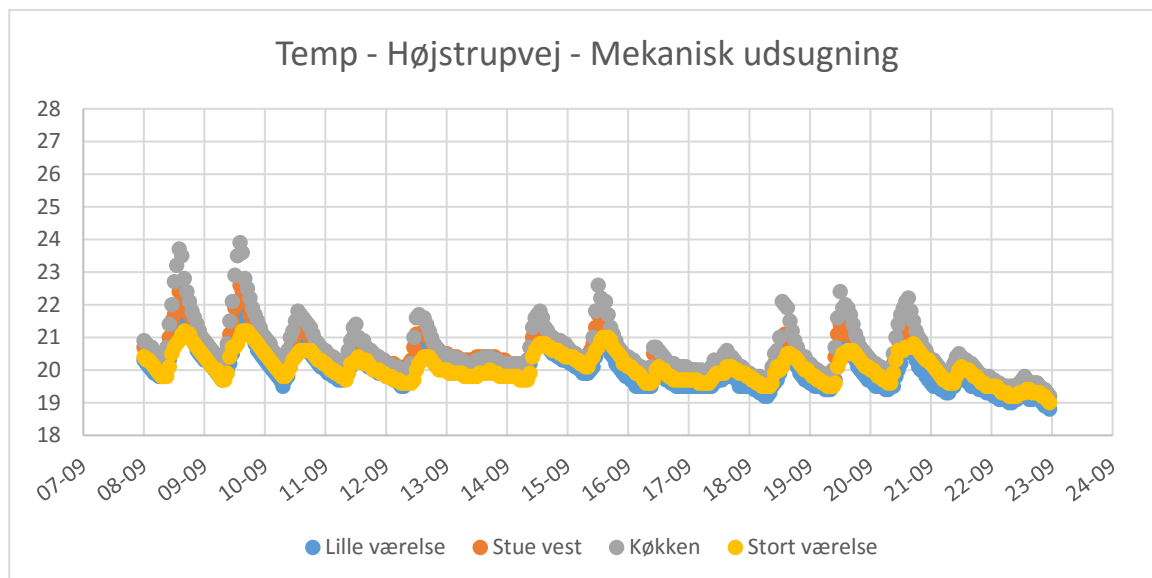
Ved alle ventilationsprincipper ses det af ovenstående figurer, at der generelt forekommer en god luftopblanding i lejligheden, eftersom den relative fugtighed stort set er identisk i alle tre målepunkter. Der er ingen signifikant forskel mellem værdierne ved de forskellige ventilationsprincipper.

4.5 Måling af temperatur, CO₂ og fugt i lejligheden på Højstrupvej

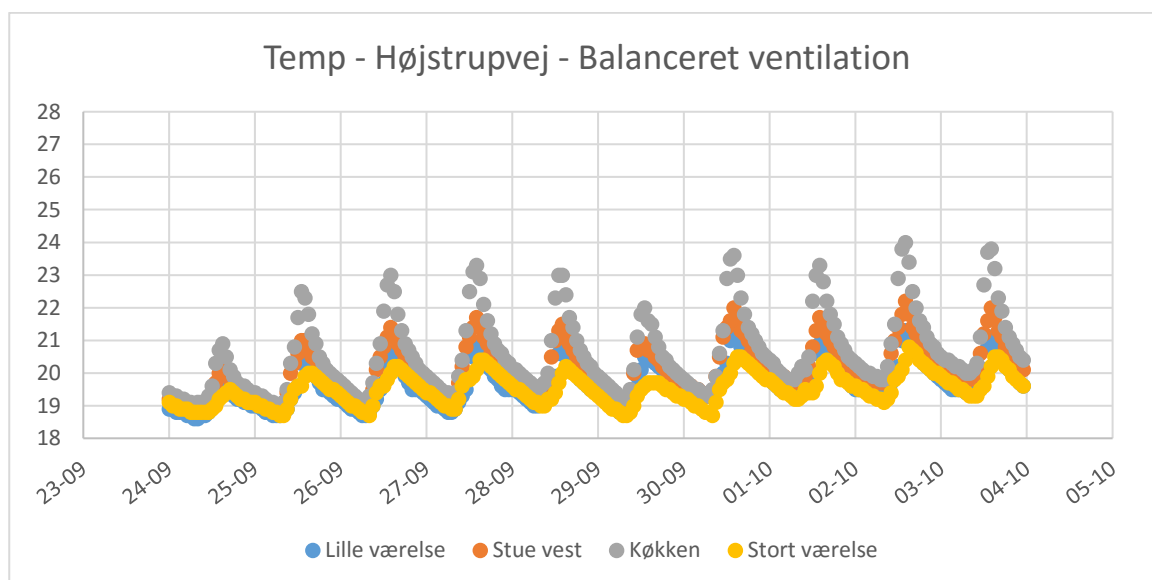
Som tidligere beskrevet er der foretaget målinger i tre sæsoner. I disse sæsoner varieres ventilationsprincippet mellem behovstyret ventilation og mekanisk udsugning. Der er desuden foretaget et sæt ekstra målinger, hvor den behovstyrede ventilation er forceret for at opnå et luftskifte på 0,5 ⁻¹h for at øge sammenligningsgrundlaget mellem ventilationsprincipperne.

4.5.1 Temperatur

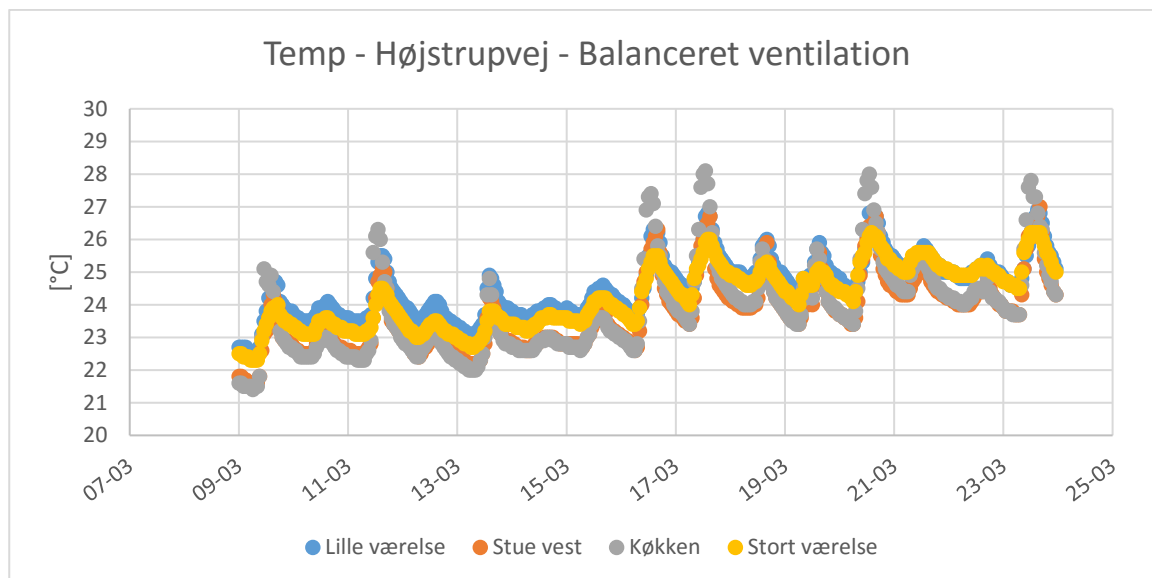
Temperaturen er målt i tre scenarier; ved forceret ventilation, balanceret ventilation og mekanisk udsugning. Ved forceret ventilation og mekanisk udsugning har luftskiftet ca. været 0,5⁻¹h. Ved balanceret ventilation har luftskiftet været lavere. Det er valgt at vise en måleperiode fra om sommeren/efteråret og en om vinteren. Forskellen mellem måleperioderne er, at der i sommerperioden ikke er indsat radiatorer. Herved kan de aktuelle temperaturprofiler som vil forekomme i lejligheden om sommeren ses.



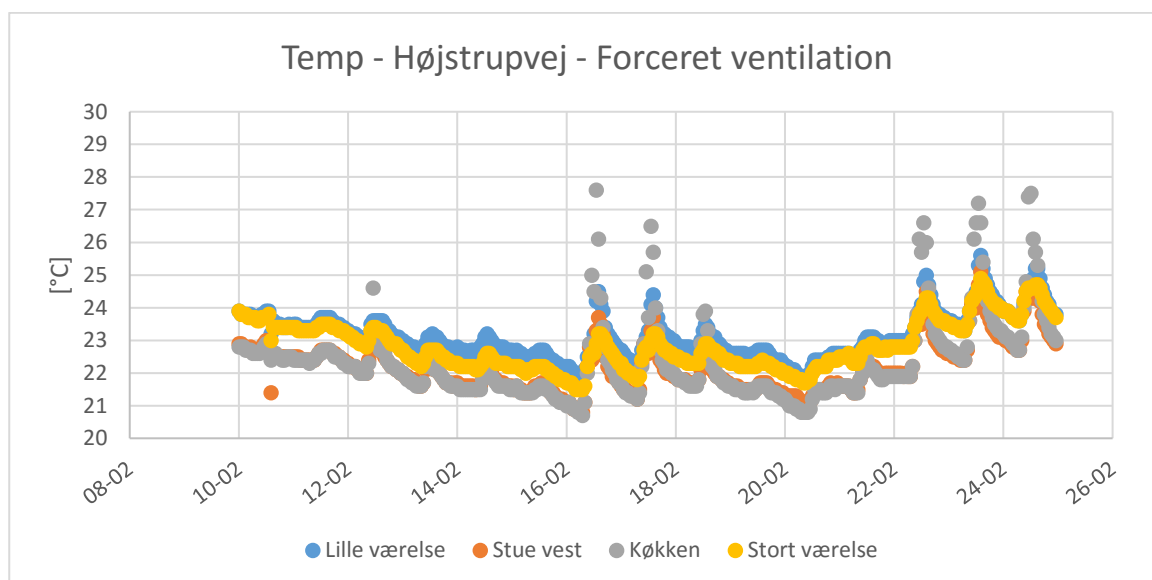
Figur 4.13 Temperaturen ved mekanisk udsugning i sommerperioden.



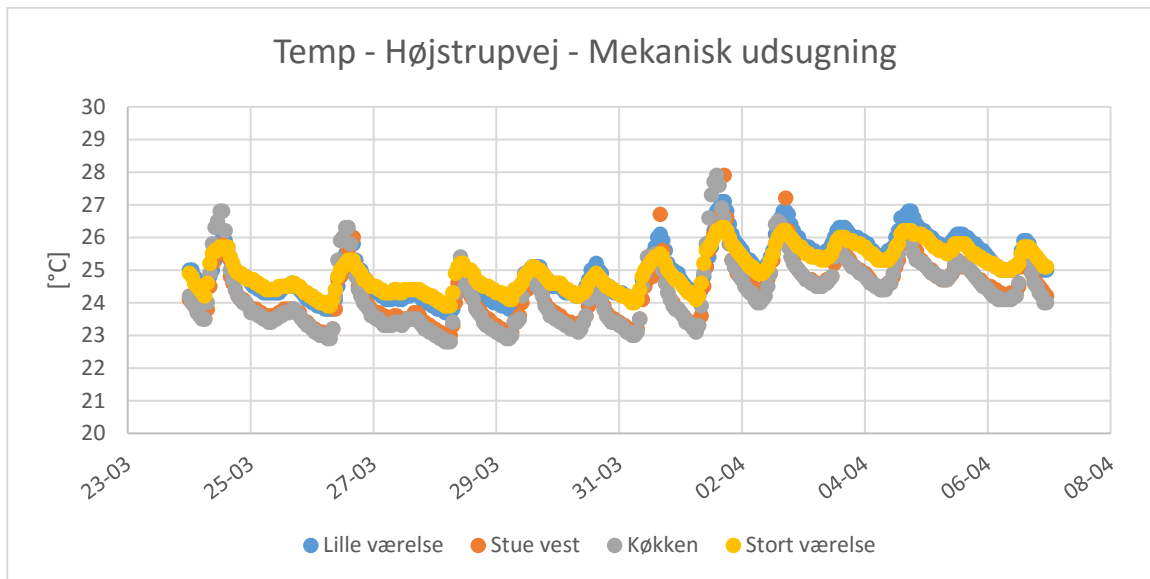
Figur 4.14 Temperaturen ved balanceret ventilation i sommerperioden.



Figur 4.15 Temperaturen ved balanceret ventilation i vinterperioden.



Figur 4.16 Temperaturen ved forceret ventilation i vinterperioden.



Figur 4.17 Temperaturen ved mekanisk udsugning i vinterperioden.

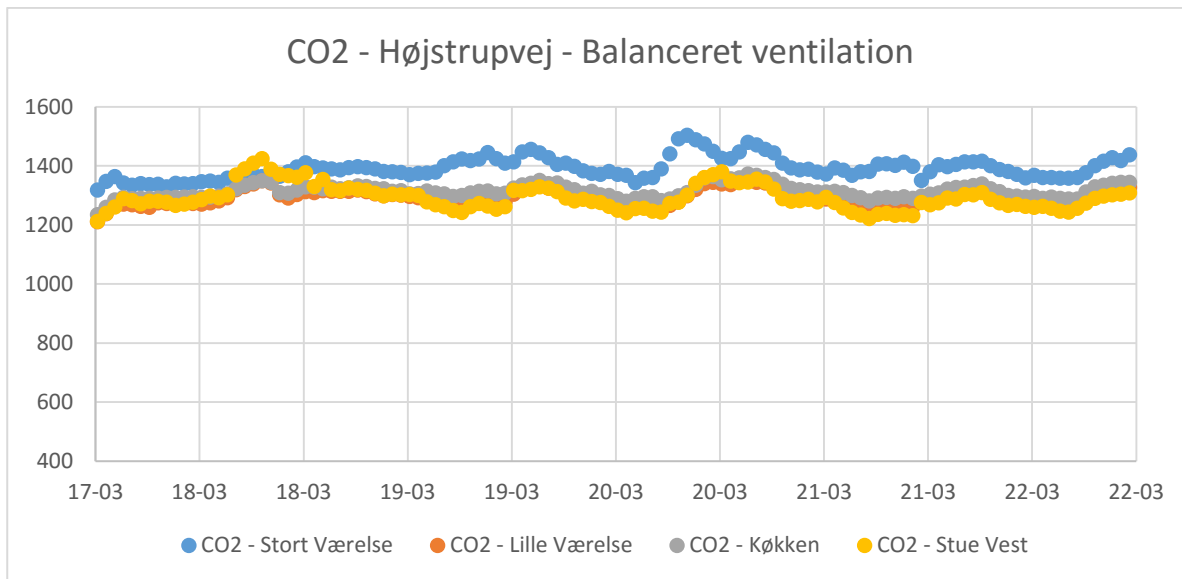
Opsummering:

Temperaturerne i lejligheden i sommerperioden befinder sig ved begge ventilationsprincipper uden for indeklimaklasse C, som tillader en temperatur på $24,5 \pm 2,5^\circ\text{C}$. Almindeligvis vil der i en lejlighed være en større intern varmelastning, hvorved temperaturerne vil stige.

Temperaturerne som er angivet ovenfor kan ikke som enkeltstående data anvendes til at vurdere på indeklimaet. Dette skyldes, at der i lejligheden er opsat el-radiatorer, som er indstillet til at levere en højere effekt end almindeligt, eftersom der derved opnås en bedre målenøjagtighed på elforbruget til el-radiatorerne. Temperaturerne skal derfor udelukkende anvendes til videre analyse af energiforbruget.

4.5.2 CO₂

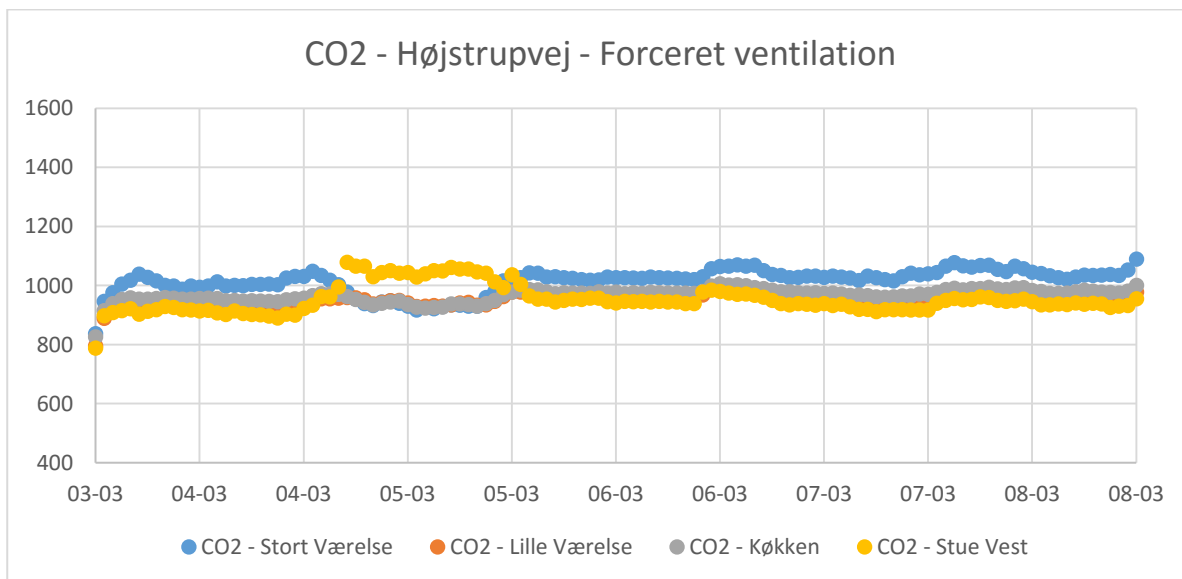
CO₂ koncentrationen er målt i tre scenarier; ved forceret ventilation, balanceret ventilation og mekanisk udsugning. Ved forceret ventilation og mekanisk udsugning har luftskiftet ca. været $0,5^{-1}\text{h}$. Ved balanceret ventilation har luftskiftet været lavere.



Figur 4.18 CO₂ koncentration ved balanceret ventilation.

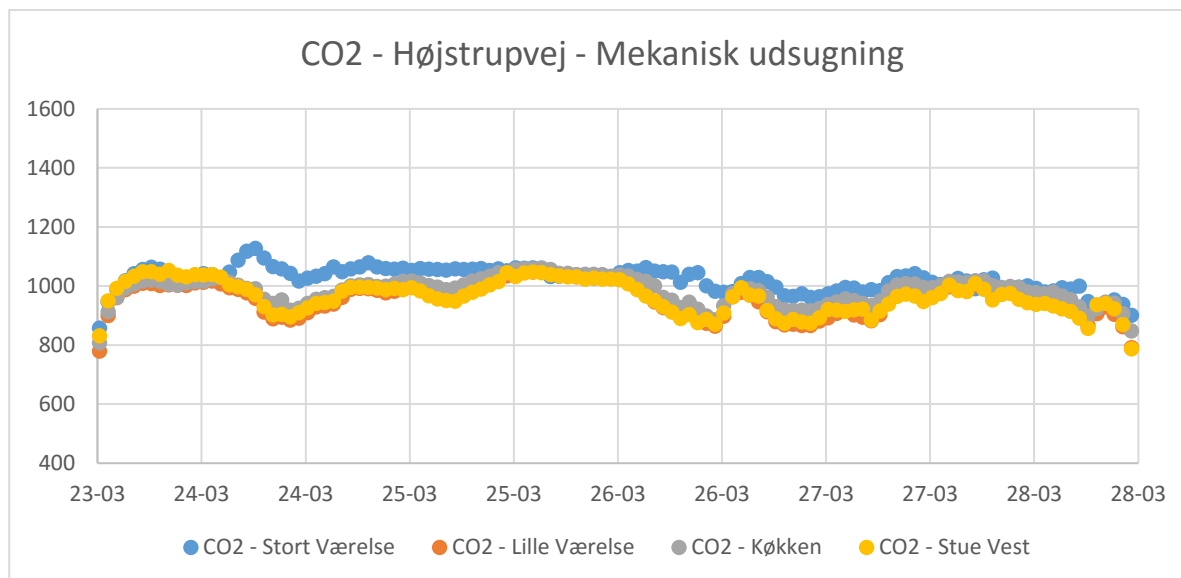
Som det fremgår af ovenstående figur er middelmiddelt koncentration i den udvalgte periode ca. 1230 ppm, hvilket svarer til en indeklimaklasse C.

Forceret ventilation angiver blot, at det balancerede ventilationsanlæg er sat i en konstant forceret drift, hvor luftskiftet svarer til 0,5⁻¹h.



Figur 4.19 CO₂ koncentration ved forceret ventilation.

Som det fremgår af ovenstående figur forekommer der generelt en mindre variation i CO₂ koncentrationen end ved den balanceret ventilation. Dette skyldes, at ventilationsanlægget kører i samme driftspunkt. Middelmiddelt koncentration er i den udvalgte periode ca. 900 ppm, hvilket svarer til en indeklimaklasse B.



Figur 4.20 CO₂ koncentration ved mekanisk udsugning.

Som det fremgår af ovenstående figur forekommer der en variation i CO₂ koncentrationen i især starten og slutning af måleperioden, hvilket skyldes doseringsmetoden og doseringslængden som tidligere beskrevet. Den mekaniske udsugning har kørt i samme driftspunkt i hele perioden. Middelkoncentration er i den udvalgte periode ca. 910 ppm, hvilket svarer til en indeklimaklasse C.

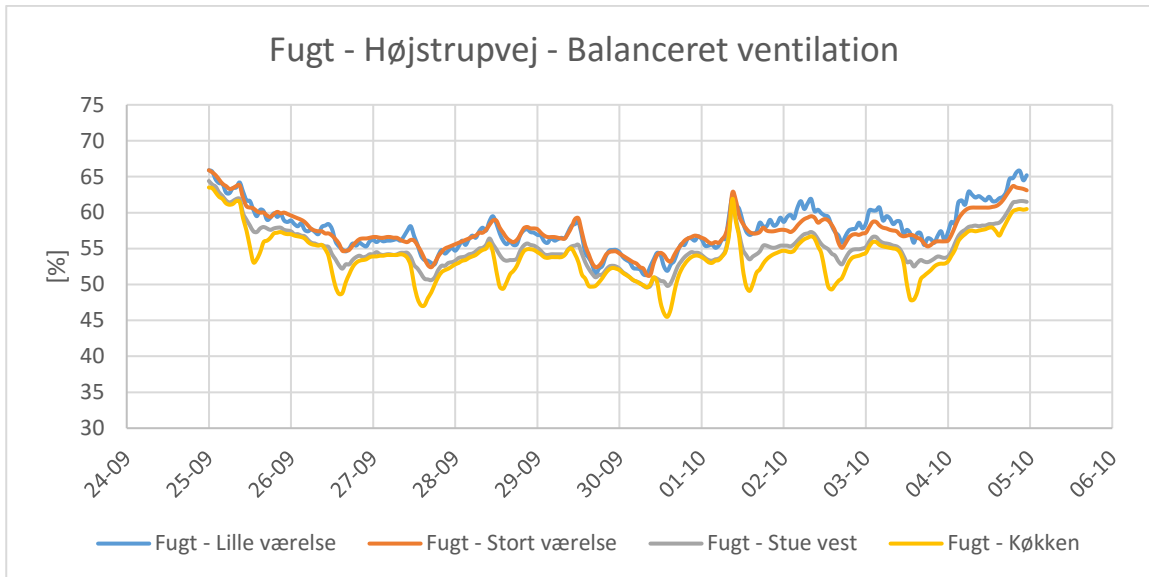
Opsummering:

Årsagen til at CO₂ koncentrationen differentierer sig mellem balanceret ventilation og de andre to ventilationsprincipper er, at luftskiftet har været lavere. Hvor meget lavere vides ikke med sikkerhed.

Ved alle ventilationsprincipper ses det af ovenstående figurer, at der generelt forekommer en god luftopblanding i lejligheden, eftersom CO₂ koncentrationen stort set er identisk i alle tre målepunkter.

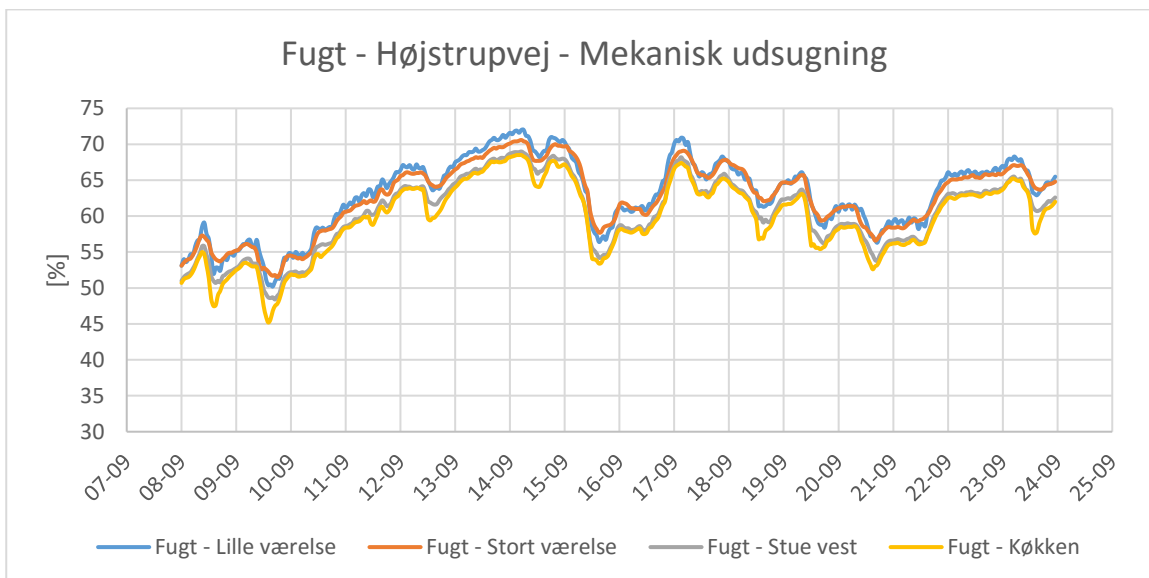
4.5.3 Fugt

Den relative fugtighed er målt i to scenarier; ved balanceret ventilation og mekanisk udsugning. Ved mekanisk udsugning har luftskiftet ca. været 0,5⁻¹h. Ved balanceret ventilation kendes luftskiftet ikke.



Figur 4.21 Den relative fugtighed balanceret ventilation.

Som det fremgår af ovenstående figur forekommer der en løbende variation i den relative fugtighed i den udvalgte måleperiode. Dette skyldes primært udekonditionerne og at ventilationsanlægget løbende regulerer luftmængderne. Middelværdien er i den udvalgte periode ca. 57 %, hvilket svarer til en indeklimaklasse B, som tillader en relativ fugtighed mellem 25-60 %.



Figur 4.22 Den relative fugtighed mekanisk udsugning.

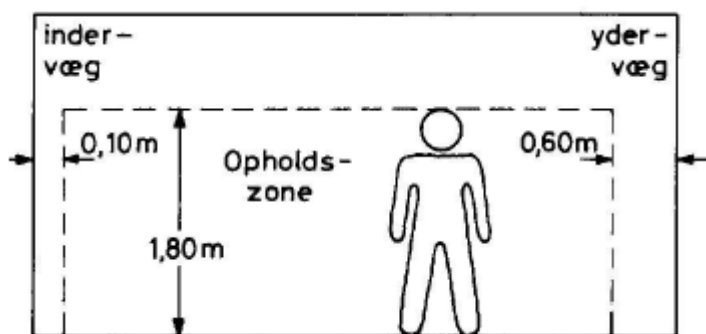
Som det fremgår af ovenstående figur forekommer der en løbende variation i den relative fugtighed i den udvalgte måleperiode. Dette skyldes udekonditionerne. Middelværdien er i den udvalgte periode ca. 62 %, hvilket er inden for indeklimaklasse C, som tillader en relativ fugtighed mellem 20-70 %.

Opsummering:

Ved alle ventilationsprincipper ses det af ovenstående figurer, at der generelt forekommer en god luftopblanding i lejligheden, eftersom den relative fugtighed stort set er identisk i alle tre målepunkter. Der ses en forskel mellem den relative fugtighed mellem de to anvendte ventilationsprincipper. Dette kan både skyldes udekonditionerne og at det balanceret ventilationsanlæg har kørt i et højere driftspunkt.

4.6 Måling af træk

For at undersøge om luften som strømmer igennem ventilationsvinduerne opvarmes tilstrækkeligt før den tilføres lejligheden måles træk. Trækmålingerne er foretaget på en kold vinterdag med en udetemperatur på omkring 0°C. Opholdszonen er vedtaget ud fra den typisk definerede zone, som kan ses på nedenstående figur.

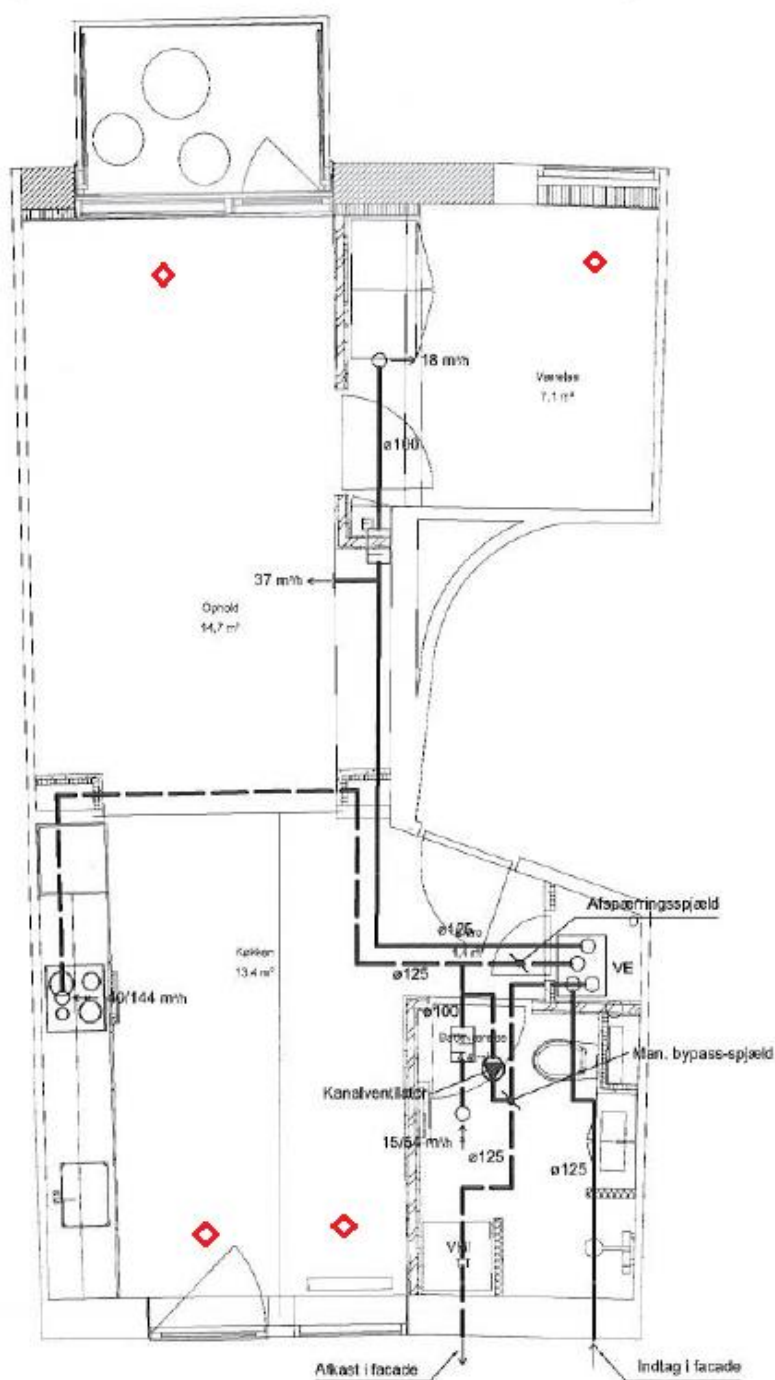


Figur 4.23 Typisk definition af opholdszonen.

Målingerne er foretaget 60 cm fra vindue/dør, hvilket svarer til ydergrænsen for opholdszonen. Dermed forventes de værste tænkelige trækgener fra vinduet at være belyst, da luftstrømme fra vinduets kuldene-fald forventes at aftage med afstanden fra vinduet.

4.6.1 Yrsavej

Trækmålingerne er foretaget i fire positioner fordelt i lejligheden. Disse er nærmere illustreret på nedenstående figur.



Figur 4.24 Plantegning for Yrsavej 18, 1.th med rød markering af målepunkter for trækmålinger. Målepunkternes position er vejledende.

Ved hver position er der foretaget målinger i to højder; 0,5 m og 0,85 m over gulv.

	Lufthastighed [m/s]	Turbulensg rad	DR ¹ (trækgener) (ved T _i = 20°C)	DR ¹ (trækgener) (ved T _i = 24°C)
Vindue i køkken				
Målehøjde 0,85 m	0,09	39%	8%	6%
Målehøjde 0,50 m	0,07	23%	5%	3%
Dør i køkken				
Målehøjde 0,85 m	0,06	7%	3%	2%
Målehøjde 0,50 m	0,07	17%	4%	3%
Vindue i stue				
Målehøjde 0,85 m	0,08	42%	7%	5%
Målehøjde 0,50 m	0,08	28%	6%	5%
Vindue i værelse				
Målehøjde 0,85 m	0,11	31%	11%	8%
Målehøjde 0,50 m	0,07	10%	4%	3%

Tabel 4.4.6.1
(trækgener).

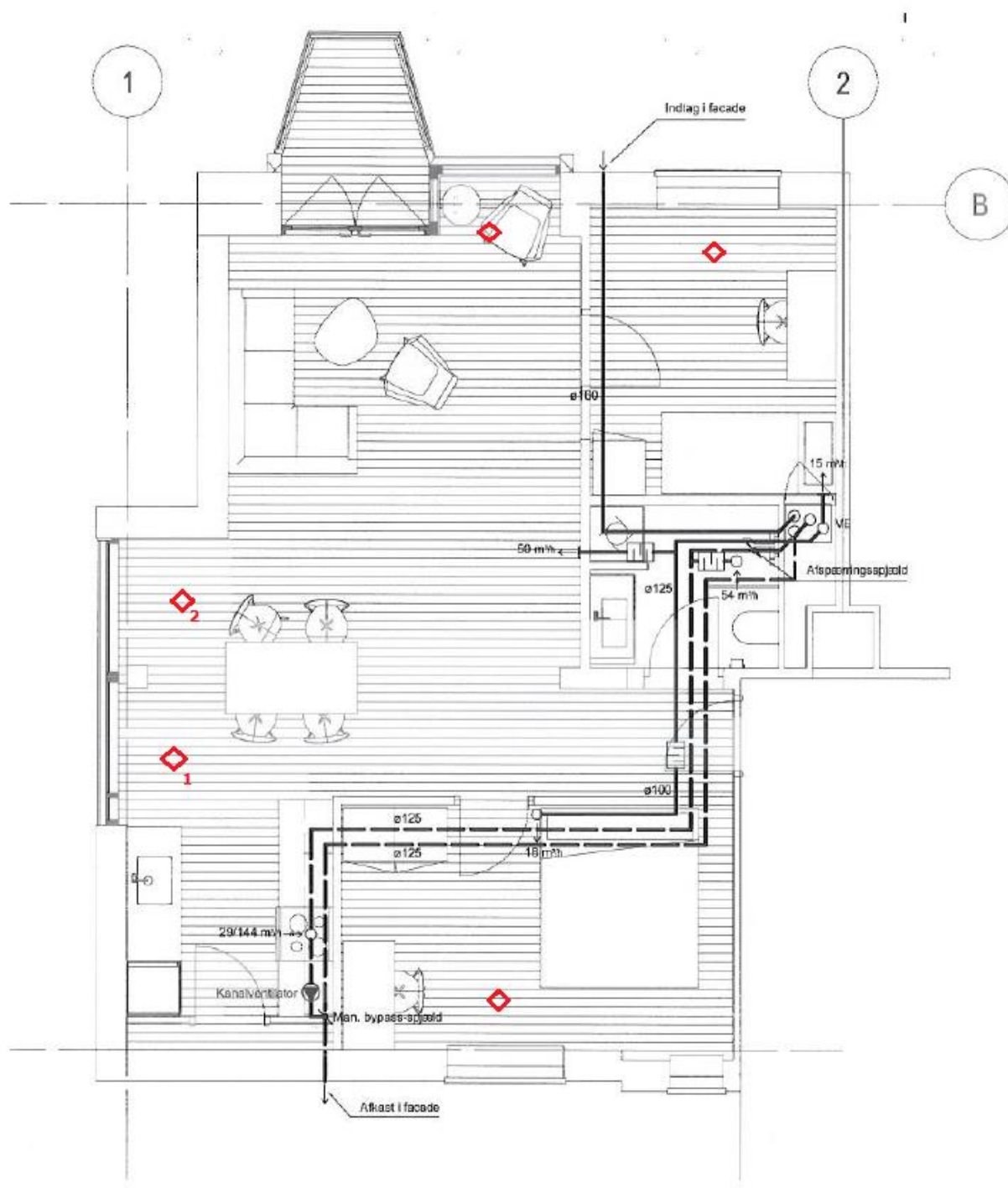
Måling og lufthastigheder og turbulensgrader samt beregning af DR¹

Som det fremgår af tabellen er DR generelt under 10% med et gennemsnit på 5%. Ifølge DS1752 tillader indeklimaklasse A op til 15% i DR.

4.6.2 Højstrupvej

Trækmålingerne er foretaget i fem positioner fordelt i lejligheden. Disse er nærmere illustreret på nedenstående figur.

¹ DR = Draught rating, som betyder det procentvis forventede antal utilfredse personer grundet træk



Figur 4.25 Plantegning for Højstrupvej 42, st.tv med rød markering af målepunkter for trækmålinger. Målepunkternes position er vejledende.

Ved hver position er der foretaget målinger i to højder; 0,5 m og 0,85 m over gulv.

Vindue i køkken (1)	Lufthastighed [m/s]	Turbulensg rad	DR¹ (trækgener) (ved T_i = 20°C)	DR¹ (trækgener) (ved T_i = 24°C)
Måleheight 0,85 m	0,07	33%	5%	4%
Måleheight 0,50 m	0,08	28%	6%	5%
Vindue i køkken (2)				
Måleheight 0,85 m	0,05	30%	0%	0%
Måleheight 0,50 m	0,07	35%	5%	4%
Vindue i stue				
Måleheight 0,85 m	0,06	15%	3%	2%
Måleheight 0,50 m	0,06	27%	3%	2%
Vindue i lille værelse				
Måleheight 0,85 m	0,07	37%	5%	4%
Måleheight 0,50 m	0,06	25%	3%	2%
Vindue i stort værelse				
Måleheight 0,85 m	0,06	11%	3%	2%
Måleheight 0,50 m	0,07	13%	4%	3%

Tabel 4.6.2 Måling og lufthastigheder og turbulensgrader samt beregning af DR¹ (trækgener)

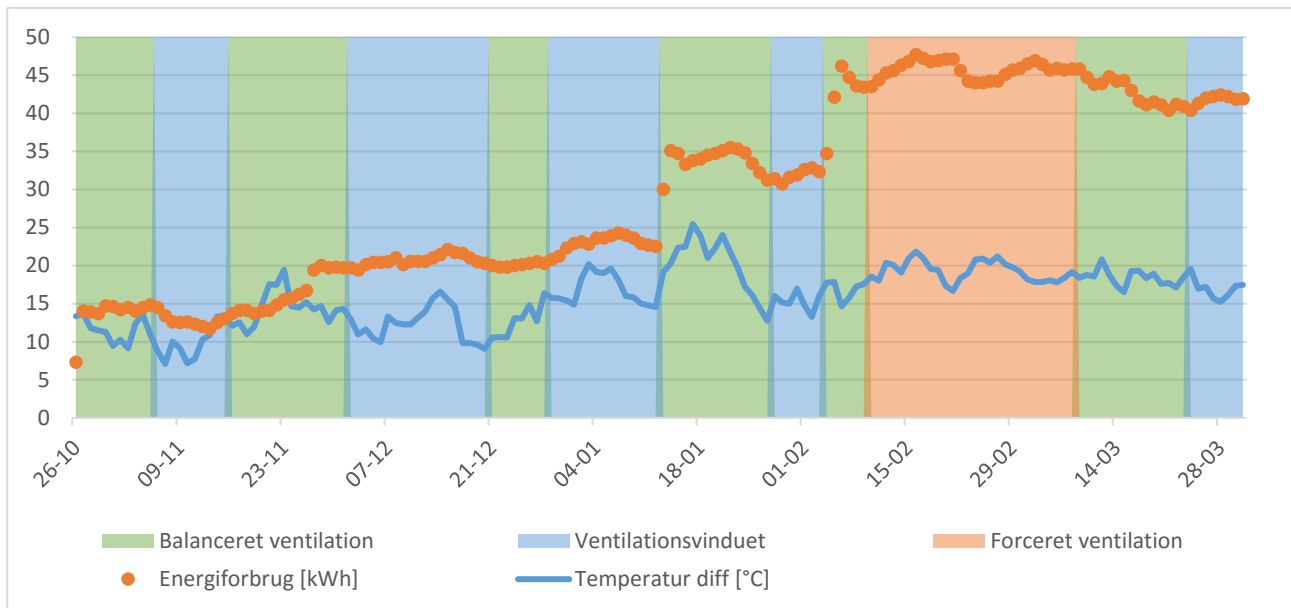
Som det fremgår af tabellen er DR mindre end 7% med et gennemsnit på 4%, hvilket er inden for indeklimaklasse A.

4.7 Måling af energiforbrug

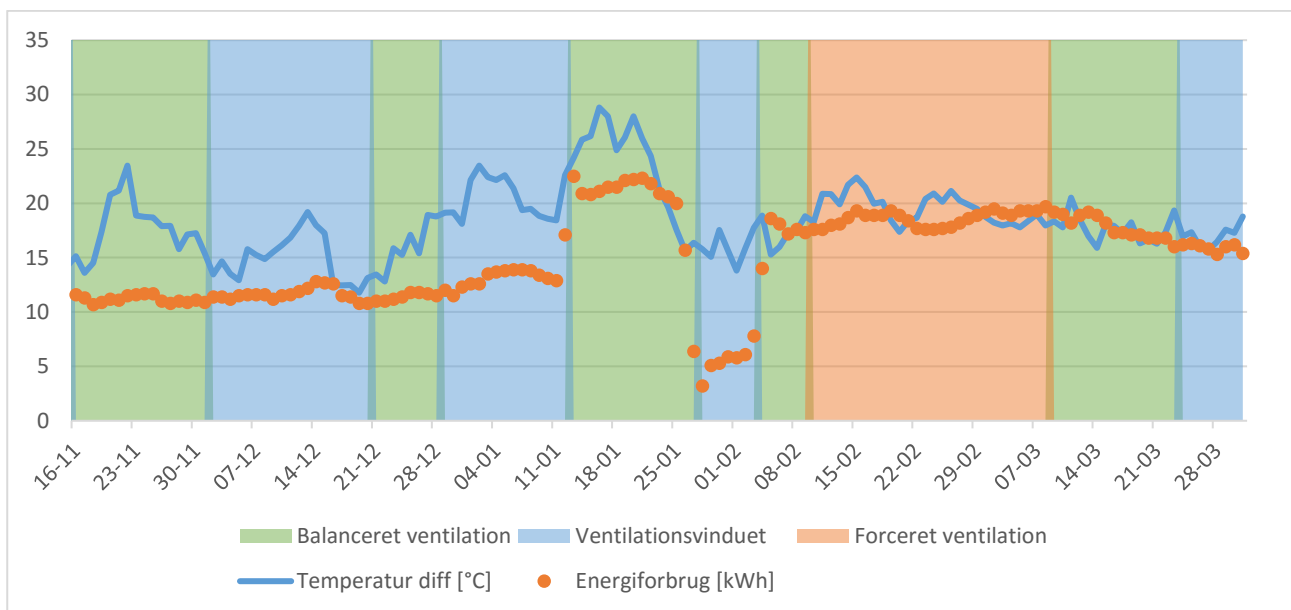
Som tidligere beskrevet er der foretaget målinger i tre sæsoner. I disse sæsoner varierer ventilationsprincippet mellem behovstyret ventilation og mekanisk udsugning. Der er desuden foretaget et sæt ekstra målinger, hvor den behovstyrede ventilation er forceret for at opnå et luftskifte på 0,5 ⁻¹h for at øge sammenligningsgrundlaget mellem ventilationsprincipperne.

I samme periode er energiforbruget til opvarmning, af de to lejligheder, blevet målt. Som det tidligere er nævnt har lejlighederne været opvarmet med el-radiatorer, hvilket giver høj præcision i målingerne af energiforbruget.

På Figur 4.26 og Figur 4.27 er det daglige energiforbrug og temperatur differencer illustreret. På figurerne ses det tydeligt, at der d. 18-01-2016 er blevet opstillet ekstra radiatorer, for at opretholde det termiske indeklima.



Figur 4.26 Varmeforbrug og temperatur forskelle - Højstrupvej



Figur 4.27 Varmeforbrug og temperatur forskelle - Yrsavej

Modellering af det daglige akkumulerede energiforbrug med data indsamlet for Højstrupvej ($n = 161$) fandt en signifikant effekt af ventilationsprincippet. Det højeste energiforbrug er fundet for mekanisk ventilation, efterfulgt af balanceret ventilation, som er 0.34 enheder lavere ($p = 0.11$). Det laveste energiforbrug er fundet for forceret ventilation, som var signifikant lavere end både mekanisk og balanceret ventilation.

En tilsvarende modellering for Yrsavej fandt en lignende (men ikke signifikant) trend, mekanisk ventilation med det højeste energiforbrug efterfulgt af balanceret ventilation med et 0.38 enheder lavere energiforbrug ($p = 0.11$), dog kun ved det laveste solindstrålingsniveau (solar = 6.1). Ved højere solindstrålingsniveauer forsvandt denne forskel. Analysen for Yrsavej har formentligt haft en mindre styrke grundet en mindre sample-størrelse ($n = 140$).

De her udførte modelleringer af de indsamlede tidsserier for hhv. Højstrupvej og Yrsavej demonstrerer, at relativt små forskelle i energiforbruget mellem behandlingerne effektivt kan bestemmes til trods for store forskelle mellem undersøgelsens testperioder, samt afhængigheder i data indsamlet over tid.

For begge lejligheder er det fundet, at den forcerede ventilation har det laveste energiforbrug. Det blev først besluttet at teste dette ventilations princip sent i forløbet, og er derfor kun testet i en enkelt periode. Grundet dette kan der forekomme konfundering, det formodes at det lave energiforbrug til dels skyldes en trend i perioden, frem for ventilations princippet.

Der vil være en konstant varme overførsel til og fra de omkringliggende lejligheder. Denne varmeoverførsel har ikke været mulig at kontrollere, under målingerne. Under brug af ventilationsvinduet, kan luften blive trukket ind i lejlighederne gennem utætheder til naboledigheder, frem for gennem vinduerne, denne luft kan være varmere end den udsugede, hvilket vil medføre et varmetilskud fra ventilationen. Som de tidligere undersøgelser har vist, lever lejligheden på Yrsavej ikke op til tæthedskravet.

Efter målingerne er udført, er det blevet oplyst, at ventilerne i ventilationsvinduerne i lukket tilstand er 40% åbne. Var regulære vinduer installeret ville forskellen i energiforbrug være endnu større.

Grundet de mange usikkerheder, bør der udføres grundigere tests, før der kan drages en endelig konklusion omkring energiforbruget.

For den fulde statistiske analyse, se bilag.

4.8 Totaløkonomisk analyse

Set over den tekniske levetid for ventilationsanlæg på 20 år, vil det totaløkonomiske aspekt være behæftet med de samme usikkerheder som målingerne og den statiske analyse.

		Yrsavej		Højstrupvej	
		Balanceret ventilation	Ventilationsvinduet	Balanceret ventilation	Ventilationsvinduet
Købspris	[Kr.]	47.075	44.685	47.075	54.370
Elpris	[Kr./kWh]	2,05	2,05	2,05	2,05
Varmepris	[Kr./kWh]	0,39	0,39	0,39	0,39
Årligt elforbrug	[kWh]	110	88	166	88
Ekstra varmemeforbrug	[kWh]	0	139	0	124
Levetid	[År]	20	20	20	20
Pris over levetid	[Kr.]	51.565	49.363	53.899	58.933

Tabel 4.8.1 – Hovedtal for den totaløkonomiske analyse. Købspris indeholder prisen for hhv. ventilationsanlæggets og udsugningsanlæggets ekstrapris for ventilationsvinduet.

Totaløkonomien er for balanceret ventilation fastsat ud fra anskaffelsespris af ventilationsanlæg og udgift til ventilationsanlæggets elforbrug over levetiden. For ventilationsvinduet er det anskaffelsespris af udsugningsanlæg, pris difference mellem ventilationsvinduet og almindelige vinduer, udgift til udsugningsanlæggets elforbrug over levetiden, samt udgiften til det yderligere varmemeforbrug sammenlignet med balanceret ventilation.

Resultaterne ses i Tabel 4.8.1. Det ses at købsprisen er den styrende faktor for totaløkonomien. Forskellen i energiforbrug er for lille til for alvor at gøre en forskel. For Yrsavej er prisen set over

levetiden næsten identisk, ventilationsvinduet er ca. 4% billigere. For Højstrupvej er der større forskel, her er ventilationsvinduet ca. 9% dyrere.

Referencer

1. Dansk Standard DS1752 - projekteringskriterier for indeklimaet
2. Dansk Standard DS15251 – Input-parametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik

Bilag – Statistisk analyse

Bilag – Lydmålinger

Bilag – Notat vedr. bygningsakustiske forhold