



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Behovsstyret ventilation i ældre etageboliger

Koncept, beregninger og vurderinger af indeklima, energiforbrug og brugertilfredshed

Øien, Turid Borgestrand; Wilke, Göran; Fløe Sørensen, Carsten; Gunnarsen, Lars

Creative Commons License
Ikke-specificeret

Publication date:
2024

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Øien, T. B., Wilke, G., Fløe Sørensen, C., & Gunnarsen, L. (2024). *Behovsstyret ventilation i ældre etageboliger: Koncept, beregninger og vurderinger af indeklima, energiforbrug og brugertilfredshed*. Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet. BUILD Rapport Bind 2024 Nr. 08

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



BUILD

RAPPORT

2024:08

Behovsstyret ventilation i ældre etageboliger

Koncept, beregninger og vurderinger af indeklima,
energiforbrug og brugertilfredshed

Turid Borgstrand Dien, Göran Wilke, Carsten Fløe Sørensen & Lars Gunnarsen



BEHOVSSTYRET VENTILATION I ÆLDRE ETAGEBOLIGER

Koncept, beregninger og vurderinger af indeklima,
energiforbrug og brugertilfredshed

TITEL	Behovsstyret ventilation i ældre etageboliger
UNDERTITEL	Koncept, beregninger og vurderinger af indeklima, energiforbrug og brugertilfredshed
SERIETITEL	BUILD-rapport 2024:08
FORMAT	Digital
UDGIVELSEÅR	2024
UDGIVET DIGITALT	Juli 2024
FORFATTER	Turid Borgestrand Øien, Göran Wilke, Carsten Fløe Sørensen og Lars Gunnarsen
SPROG	Dansk
SIDETAL	92
LITTERATURHENVISNINGER	Side 73
EMNEORD	Ventilation, etageboliger
ISBN	978-87-94561-18-1
LAYOUT	Turid Borgestrand Øien
TEGNINGER	Angivet ved de enkelte tegninger
FOTOS	Angivet ved de enkelte fotos
OMSLAGSILLUSTRATION	Turid Borgestrand Øien
UDGIVER	Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV E-post: build@build.aau.dk Web: www.build.dk

Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven.

INDHOLD

1 SAMMENFATNING	7
2 INDLEDNING OG BAGGRUND	9
Bygningsreglementets krav til ventilation af etageboliger	10
Formål	13
3 BEHOVSSTYRET UDSUGNINGSVENTILATION	14
4 METODE	18
Cases – de tre demonstrationsprojekter	18
De to blokke i Højstrupparken	20
Sallinghus	22
Workshop	24
5 HØJSTRUPPARKEN – ERFARINGSOPSAMLING OG MÅLINGER	25
Energiforbrug og energiudgifter	34
Livscyklusvurdering	38
Implementeringserfaringer fra beboere og boligorganisation	40
6 SALLINGHUS – BEREKNINGER AF FORBRUG	46
Teoretisk gennemregning af omkostninger og forbrug af primærenergi for igangværende projekter	46
Grundlag for beregning af luftmængder, driftsscenarier og energiforbrug	49
7 VARMEGENVINDING	59
Muligheder og udfordring ved varmegenvinding	59
8 DISKUSSION	64
Aktualitet	64
Videreudvikling i demonstrationsprojekterne	65
9 OPSAMLING	69
10 LITTERATURLISTE	71
BILAG 1: STYREALGORITMER TIL BEHOVSSTYRET VENTILATION	74
Samspil mellem luft inde og ude	74
Sidegevinster ved behovsstyret ventilation	77
Forskellige former for styring	77
Data og algoritmer	79
Litteraturliste	84
BILAG 2: UDDYBENDE RESULTATER FOR LCA AF HØJSTRUPPARKEN	85

FORORD

Løbende udelufttilførsel ved naturlig eller mekanisk ventilation er afgørende for at opretholde et godt indeklima. Dette løses i moderne renoveringer oftest med balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding af hensyn til både energikrav og indeklima. I kraft af den teknologiske udvikling vokser der alternativer frem inden for ventilationsteknologien. Disse alternativer søger at løse generelle eller mere kontekstspecifikke behov og ønsker i forbindelse med ventilation i boliger.

Behovsstyret udsugningsventilation er en ventilationsløsning, der er opstået som svar på en række specifikke udfordringer vedrørende renovering af eksisterende etagebyggerier. Landsbyggefonden har i samarbejde med en række almene boligafdelinger igangsat demonstrationsprojekter med henblik på at afprøve, opsamle erfaringer og videreudvikle denne form for ventilation. I denne rapport formidles de første erfaringer fra demonstrationsprojekterne. Arbejdet med rapporten har endvidere dannet grundlaget for Indkøbsvejledning for behovstilpasset udsugningsventilation i eksisterende etageboliger (Øien m.fl. 2023), der udkom i efteråret 2023.

Projektgruppen bestod af Lars Gunnarsen og Turid Borgestrand Øien fra BUILD, Aalborg Universitet, Carsten Fløe Sørensen, WSP og Göran Wilke, EXERGI. Rapporten er udarbejdet på baggrund af empiri indsamlet fra demonstrationsprojektet i Højstrupparken (Fyns Almennyttige Boligselskab [FAB], Odense) og beregninger fra Sallinghus (SAB/KAB, København), mens Solhusene (Bo-Vest, Albertslund) er trukket ind som perspektiverende case. I kapitlet om Højstrupparken har Göran Wilke stået for rapportering af indeklimate målinger og energiforbrug, herunder en analyse af indeklima i soveværelse. Göran Wilke har endvidere stået for beskrivelsen af styringsalgoritmer, som er grundlaget for behovsstyret udsugningsventilation (bilag 1), Kai Kanafani og Christoffer Ole Olsen har bidraget med livscyklusvurderingen, og Turid Borgestrand Øien har stået for interviews med beboere, projektleder og rådgivere i de tre cases. I kapitlet om Sallinghus har Carsten Fløe Sørensen beregnet økonomi, energi- og CO₂-forbrug, mens Lars Gunnarsen har stået for analyserne af CO₂-belastning. Kapitlet om varmegenvinding er udarbejdet af Göran Wilke, som bl.a. har hentet inspiration fra en workshop afholdt i projektet i sommeren 2022.

Vi vil gerne takke alle de medvirkende fra de tre boligafdelinger og organisationer samt de tilknyttede rådgivere for at stille op til interviews, telefonsamtaler og rundvisninger. Herudover en tak til workshopdeltagere og interessenter for værdifulde bidrag.

BUILD AAU, Sektionen for Byggeteknik, Processer og Indeklima
Juni 2024

Ernst Jan de Place Hansen
Sektionsleder

1 SAMMENFATNING

Denne rapport skal ses som et bidrag til fremme af innovation vedrørende boligventilation, hvor bygningsreglementets tidligere krav om balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding udfordres. Rapporten beskriver et ventilationskoncept, hvor luftskiftet i den enkelte bolig styres individuelt og automatisk med et ventilationsanlæg, der udelukkende er baseret på udsugning. Konceptet har et væsentligt lavere fodaftryk i den enkelte bolig i forbindelse med kanalarbejder samt tilhørende bygningsmæssige tiltag og dermed samtidig lavere omkostninger i forbindelse med disse arbejder. I behovsstyret udsugningsventilation behandles hver enkelt lejlighed som én zone, hvor en eller flere sensorer, lokale vejprognoser og algoritmer i kombination med en cloudservice og styrbare spjæld (VAV) sikrer det aktuelt nødvendige luftskifte, der varierer med brugen af boligen over tid. Samtidig indeholder rapporten forskellige bud på varmegenvinding uden etablering af dyrt og pladskrævende kanal- og rørsystem til forvarmning og distribution af udeluft.

Det er projektets formål at formidle erfaringer med renoveringsprojekter, hvor behovsstyret udsugningsventilation implementeres i etageboliger. Der er gennemført et omfattende måleprojekt, hvor behovsstyret og balanceret udsugningsventilation er analyseret i to helt ens bygninger. I forsøget er indeklima, luftmængder og energiforbrug registreret. Resultaterne skal læses med det forbehold, at det er et begrænset studie for 30 boliger. Analyserne er suppleret med interviews samt rådgiveranalyser af et andet projekt, som planlægges etableret i 2024.

Resultater fra CO₂- og fugtmålinger stammer fra et demonstrationsprojekt i Højstrupparken (FAB, Odense), hvor behovsstyret udsugningsventilation er etableret i 15 af bebyggelsens lejligheder. Det samlede luftskifte er omkring 40 % lavere i lejlighederne med behovsstyret ventilation, og målinger viser marginalt færre ikkeanbefalede CO₂-koncentrationer end i de 15 referencelejligheder med balanceret ventilation.

Det skal særligt bemærkes, at den målte reduktion i luftskiftet på 40 % i kombination med et uændret eller marginalt bedre indeklima forudsætter en avanceret styring, som baseres på hyppige målinger og lokale vejrdata (bilag 1).

Via styringen opreguleres ventilationen i den enkelte bolig ved en aktuel stigning i forurening og sikrer et bedre indeklima på trods af et væsentligt mindre luftskifte. Den behovsstyrede ventilation har generelt været godt modtaget af beboerne, og i interviews bliver især muligheden for at bibeholde eksisterende udluftningsrutiner og fraværet af støjgener trukket frem som fordele ved løsningen. Selvom den gennemsnitlige målte lufttemperatur i boligerne blev målt til tæt på 22° C, var der flere beboere, der oplevede trækgener ved den behovsstyrede ventilation på særligt blæsende dage. Af hensyn til det aktuelle demonstrationsprojekt og for ikke at påvirke oplevelsen og implementeringen af de to forskellige ventilationsløsninger valgte boligorganisationens projektgruppe at informere mindst muligt om den behovsstyrede ventilation. Dette har betydet, at beboerne i mange tilfælde har været usikre på, om anlægget overhovedet fungerede, og hvordan de kunne aflæse eller vurdere dets funktion, herunder hvordan de skulle forholde sig ved den førnævnte trækproblematik.

Konceptet er videre dokumenteret gennem teoretiske beregninger af indeklima, energiforbrug og anvendeligt boligareal som en del af forarbejdet til renoveringen af bebyggelsen Sallinghus (SAB/KAB, København). Behovsstyret boligventilation bibeholder større nyttigt boligareal end den balancerede ventilation, idet der ikke skal afsættes lige så

meget plads til rørsystem til luft- og varmegenvinding. Ud over sparet CO₂-belastning i materialer og udførelser er besparelsen som vist senere i figur 5 beregnet til 0,42 m² brugsareal eller i runde tal 10.000-20.000 kroner i anlægsomkostninger pr. lejlighed. De forbrugsmæssige beregninger viser, at det primære energiforbrug til opvarmning af luft og boliger *uden* varmegenvinding er ca. 11 % større end ved almindelige balancerede ventilationsanlæg med varmegenvinding. Beregninger af klimaaftryk for en lejlighed på 75 m² viser dog, at det større energiforbrug til drift udlignes (delvist) af de sparede rørføringer. Målingerne for den behovsstyrede ventilation – *uden* varmegenvinding – i Højstrupparken viser et højere primært energiforbrug sammenholdt med decentralt balanceret ventilation med varmegenvinding på 4-5 % i det første driftsår og senere 8-9 %. Herudover viser livscyklusvurdering af de to blokke i Højstrupparken, at den behovsstyrede boligventilation har 9 % lavere klimaaftryk end den decentrale balancerede ventilation.

Mulighederne for at reducere det primære energiforbrug ved behovsstyret udsugningsventilation yderligere gennem en eller anden form for supplerende varmegenvinding blev diskuteret med deltagere fra branchen i en workshop afholdt i 2022. I lyset af at behovstilpasset udsugningsventilation med en reduktion i luftskiftet på ca. 40 % reducerer varmetabet betydeligt, er der kun behov for at genvinde en mindre del af afkastluftens energiindhold. Beregningerne på side 58-62 viser, at hvis 25 % af varmen i afkastluften ved behovsstyret ventilation udnyttes, vil energiforbruget være på niveau med balanceret ventilation med varmegenvinding og derved leve op til krav i bygningsreglementet. Ved workshoppen blev der diskuteret forskellige former for varmegenvinding, fx brug af varmepumpe til nyttiggørelse af afkastluftens energiindhold i bygningens varmeanlæg eller til produktion af varmt brugsvand. Ved kraftigt varierende elpriser kan supplerende varmegenvinding være særligt relevant, hvis driften styres efter tidspunkter med lave timepriser. Det kan desuden være attraktivt at etablere et mindre solcelleanlæg til denne elforsyning. Som følge af kapacitetskrav for udsugningsventiler i køkken og bad er luftskiftet ved balanceret ventilation konstant og væsentligt højere end mindstekravet på 0,3 l/s m². I boliger med behovsstyret ventilation justeres luftmængden først op, når forureningen nærmer sig de forudbestemte setværdier for henholdsvis relativ luftfugtighed og CO₂. Energibesparelsen kan dog ikke helt opveje effekten af varmegenvinding i forbindelse med balanceret ventilation, og økonomien for supplerende varmegenvinding ved behovsstyret ventilation er generelt ringe, hvorfor det kun kan betale sig i særlige tilfælde.

Rapporten afsluttes med en diskussion af resultaternes relevans, skalerbarhed samt den videre udvikling i forlængelse af projektet. Vi peger her bl.a. på:

- behovet for tilpasning af de valgte ventilationsprincipper til mulighederne i de aktuelle bebyggelser
- at en fortsættelse af projektet med længere tids dataindsamling og erfaringer, der rækker ud over etablering og den første tid med drift af de nye systemer, vil give relevant supplerende viden
- at mulighederne i behovstilpasset udsugningsventilation kan blive væsentligt forbedret, hvis og når branchen får udviklet relevante systemer til varmegenvinding fra den udsugede luftstrøm.

2 INDLEDNING OG BAGGRUND

Danskere tilbringer i gennemsnit 80-90 % af livet inden døre, hvorfor vores bygninger er en helt grundlæggende del af vores liv. Indeklimaet er afgørende for vores sundhed, komfort og produktivitet – og hvert år koster dårligt indeklima 22.000 sygdomsjusterede leveår (Jantunen m.fl. 2011).¹ Alle boliger har behov for tilførsel af frisk luft samt at komme af med forurening fra beboere, materialer og aktiviteter i boligen. Forureninger omfatter typisk fugt, støv, sporer, gasser, partikler og kemikalier fra mennesker og deres aktiviteter samt materialer inde i boligen, men også indtrængning udefra af eksempelvis partikler, pollen og radogas fra undergrunden (Gunnarsen 2011). Senest er det dokumenteret, at god ventilation kan reducere risikoen for spredning af corona og anden luftbåren smitte (Tang m.fl. 2021).

Der er et stort behov for viden og målrettet kommunikation om, hvordan man undgår skadelige eksponeringer både gennem bygningsdesign, installationer, bygningsdrift og beboeradfærd. Et optimeret og velfungerende indeklima vil også have betydning for beboernes oplevelse af bolig- og livskvalitet. Fordele ved investeringer i et godt indeklima er kun i mindre grad dokumenteret, og det har ikke været primært fokus blandt hverken bygningsbrugere, bygningsejere eller de fleste aktører i byggebranchen. Indeklimakvalitet afhænger af flere led i byggeriets værdikæde, hvorfor det at opretholde et sundt indeklima kan vise sig at være svært i praksis. Det afhænger både af den projekterede løsning, eventuelle fejl og skader i bygningen, de aktuelle installationer og driften af disse samt beboernes adfærd og hverdagspraksis, herunder indstilling af radiatorventiler, udluftning, rengøring og brug af emhætten. Et godt indeklima vil ofte være resultatet af et godt samvirke mellem beboerne og driftspersonalet (Afshari m.fl. 2020). Det er afgørende, at driftspersonalet og beboerne forstår, hvordan ventilationen overordnet fungerer, og dermed hvad de skal og kan gøre for at opretholde et godt indeklima. Det er en væsentlig forudsætning, at ventilationsløsningerne er godt projekteret, udført, indreguleret og forklaret.

Fra et beboerperspektiv vil en bygningsrenovering ofte være en investering, hvor både omkostninger og gevinster er målt i kroner og øre. Gennem de senere år er renoveringers investeringsværdi også målt i reduceret energiforbrug og CO₂-aftryk. Indeklimaet er dog som beskrevet ovenfor særligt forbundet med brugsværdier som sundhed, komfort og trivsel. Jensen m.fl. (2022) peger bl.a. på merværdi i form af trivsel, velvære, livskvalitet (viden, følelse af kontrol, selvtillid, kompetence) og sundhed (reduceret stress og øget komfort) som potentielle effekter af energirenovering af boliger. I en mere dækkende og holistisk forståelse af bæredygtighed suppleres de målbare enkeltparametre med blødere, kvalitative værdier: Temperatur og fugt bliver koblet med fysiologiske, mentale og sociale behov som trivsel og velbefindende.

Andre afledte effekter af en renovering kan handle om beboernes adfærd. Hverdagspraksisser som madlavning, tøjvask, rengøring og udluftning er en del af og med til at skabe det aktuelle indeklima (Øien & Rasmussen 2022), ligesom ændringer i de teknologier, vi omgiver os med, spiller ind på disse praksisser. Støj, slimhindegener eller

¹ DALY (Disability-Adjusted Life Year) består af to hovedkomponenter: dødelighed i form af tabte leveår ved for tidlig død og sygelighed i form af tabte år med sygdom og invaliditet.

træk fra nye ventilationsløsninger kan skabe gener i hverdagen, der fører til, at nogle beboere forsøger at blokere eller slukke ventilationsanlægget (Gabel 2022).

Bygningsreglementets krav til ventilation af etageboliger

Der er en lang tradition i Danmark for at stille krav til ventilation i boliger. Oprindeligt fokuseret på fugt, blev der stillet krav om udsugning i boligens vådrum – køkken og bad (Olufsen 1984). Ved at placere udsugning i vådrum forhindres fugtig og forurenede luft herfra i at spredes rundt i boligen. Frisk luft udefra trækkes ind i boligens tørre rum – stue, entré og soveværelse – via ventiler i vinduer og vægge samt øvrige utætheder. Med skærpede energikrav og klimahensyn er bygninger blevet mere tætte, og ventilationssystemer skal nu balancere hensyn til lavt energiforbrug og et godt indeklima.

Bygningsreglementet opererer i dag med to slags krav til boligventilation: et generelt krav om et luftskifte på 0,3 l/s m² bruttoetageareal og et kapacitetskrav til ventilationsløsningen, der skal muliggøre udsugning af henholdsvis 20 l/s og 15 l/s fra køkken og bad.

Bygningsreglementet fra 2010 og derefter indeholder et kapacitetskrav på i alt 35 l/s (1 køkken + 1 bad = 20 + 15 l/s), som dikterer luftskiftet for mindre og mellemstore lejligheder. For ventilationssystemer med konstant luftskifte – fx balanceret ventilation – betyder kapacitetskravene, at det specifikke luftskifte vil være væsentligt over kravet på 0,3 l/s m² for almindelige boligstørrelser (116 m² x 0,3 l/s m² = 35 l/s). For en lejlighed på fx 70 m² betyder kapacitetskravet, at et konstant luftskifte giver 0,5 l/s m², dvs. 67 % højere end mindstekravet på 0,3 l/s m². For lejligheder på over 116 m² er det kravet på de 0,3 l/s m², som er styrende (medmindre der er flere toiletter). Balanceret ventilation med varmegenvinding blev i 2010 lanceret som svaret på de nye energikrav. Varmegenvindingen sker, ved at varmen fra den varme og fugtige afkastluft overføres til den tilførte udeluft i en varmeveksler. Herfra kan den forvarmede luft distribueres til ejendommens beboelsesrum. Normalt skal der både etableres bypass af varmeveksleren, så der ikke bliver for varmt i boligen på varme dage, og en eftervarmeplade, så udeluften ikke bliver indblæst for koldt på kolde dage. Indregulering af systemet er en forudsætning for, at til- og fraluft er i balance, og der skal være en mekanisk ventilator i både luftafkast og lufttilførsel.

Ændringer i Bygningsreglementet pr. 1.1.2021 og 1.1.2022

Den hidtidige regulering af balanceret ventilation kan udfordres af fire forhold:

1. Forureningen i den enkelte bolig varierer kraftigt over døgnet afhængigt af antal personer og aktiviteter, hvor det faste luftskifte vil være nødvendigt højt (især i mindre boliger) og sommetider for lavt.
2. Konstant balanceret ventilation tager *ikke* højde for, at beboerne selv lugter ud.
3. Energibesparelserne efter installation af balanceret ventilation med varmegenvinding under renovering af eksisterende etageejendomme vil i mange tilfælde ikke kunne afskrive investeringen i kanaler og rørsystemer.
4. Skakte med de nye føringsveje til kanaler for både indblæsning og udsugning vil ofte reducere det brugbare boligareal.

Ændringer i BR18 pr. 1.1.2021 og 1.1.2022 har delvist taget højde for kritikpunkterne og åbner for nye ventilationsløsninger i etageboliger. Det hidtidige krav om balanceret ventilation er bortfaldet med den betingelse, at det samlede primærenergiforbrug ikke stiger. Der er indført to vigtige ændringer i bygningsreglementet:

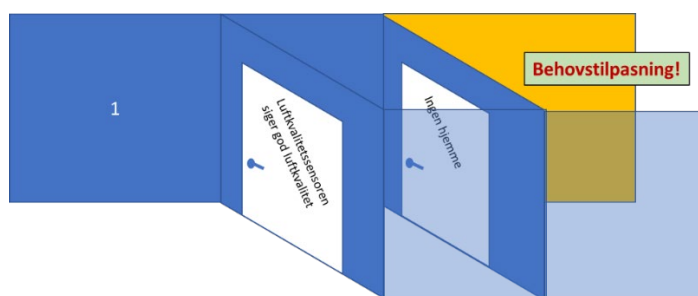
- Pr. 1.1.2021 er det tilladt at erstatte traditionel varmegenvinding med andre løsninger til energibesparelse, så længe den samlede energibesparelse er mindst lige så stor.
- Pr. 1.1.2022 må ventilationen i en bolig være ned til 0,15 l/s m² og således halvdelen af den hidtidige grænse på 0,3 l/s m². Sænkningen forudsætter, at ventilationsbehovet fastsættes baseret på måling af temperatur, relativ fugt og CO₂, samt at der ikke er personer til stede. Ved vurdering af energikonsekvenser af denne løsning må der ikke regnes med mere end 30 timer om ugen med den lave luftstrøm.

Princip for behovstilpasset udsugningsventilation

Det tidligere krav om, at udeluftskiftet skal være højt i den enkelte bolig hele tiden, passer dårligt sammen med det forhold, at vi bruger boliger meget *forskelligt* – fra store boliger med én beboer til små boliger med mange beboere. Nogle boliger står tomme halvdelen af døgnet, mens andre har beboere, der sjældent forlader hjemmet. Derfor håndteres hver bolig i behovstilpasset udsugningsventilation som en separat zone, der ventileres ud fra belastninger fra brugen og det afledte ventilationsbehov. Det er målet så vidt muligt at opretholde et tilfredsstillende indeklima uden overventilering ved både store og små belastninger.

Der er i de senere år blevet udviklet styresystemer, der måler temperatur, relativ fugtighed og CO₂-koncentration og sender data til centrale computere, der styrer spjæld og aggregater i forhold til de målte parametre – også under inddragelse af vejret og andre tilgængelige forhold. Ud over den traditionelle sensorstyring, man kender fra selvstændig bygningsautomatik, kan man via sådanne cloudløsninger med styrket regnekraft kombinere aktuelle og akkumulerede historiske målinger og derved skabe systemer, der løbende lærer og tilpasser sig de aktuelle bygninger, brugere og installationer. Desuden kan systemerne også bruges til at styre og regulere volumenstrøm, solafskærmning og udnyttelse af naturlig ventilation (Jensen, Lindholm & Mikkelsen 2016).

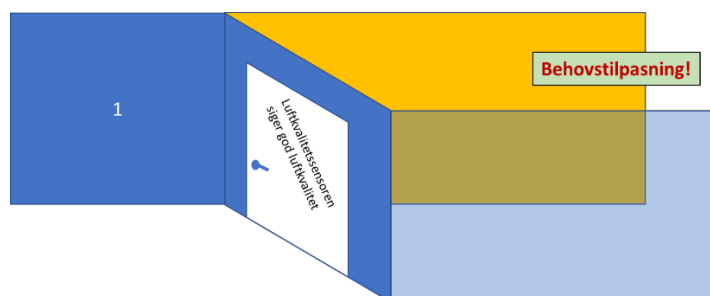
Energiforbruget til behovstilpasset ventilation må ikke være højere end for konstant balanceret ventilation med varmegenvinding. Figur 1 viser princippet for at kunne behovstilpasse ved samtidig opfyldelse af kravene om et tilfredsstillende indeklima og fravær af personer i boligen.



Figur 1. Krav til god luftkvalitet og krav om, at ingen må være hjemme, skal opfyldes, før behovstilpasning af ventilation under 0,3 l/s m² er tilladt. Tegning: Lars Gunnarsen.

Opgaven er her at sikre og dokumentere, at indeklimaet rent faktisk er i orden, med det ekstra krav, at energiforbruget minimeres. Kravet i bygningsreglementet om, at der ikke må være nogen hjemme, når ventilationen sænkes, udnytter ikke det fulde besparelspotentiale i behovstilpasningen. Ved at indeklimatestimeren dokumenterer luftkvaliteten i boligen, kan behovstilpasningen i modstrid med ordlyden af det gældende

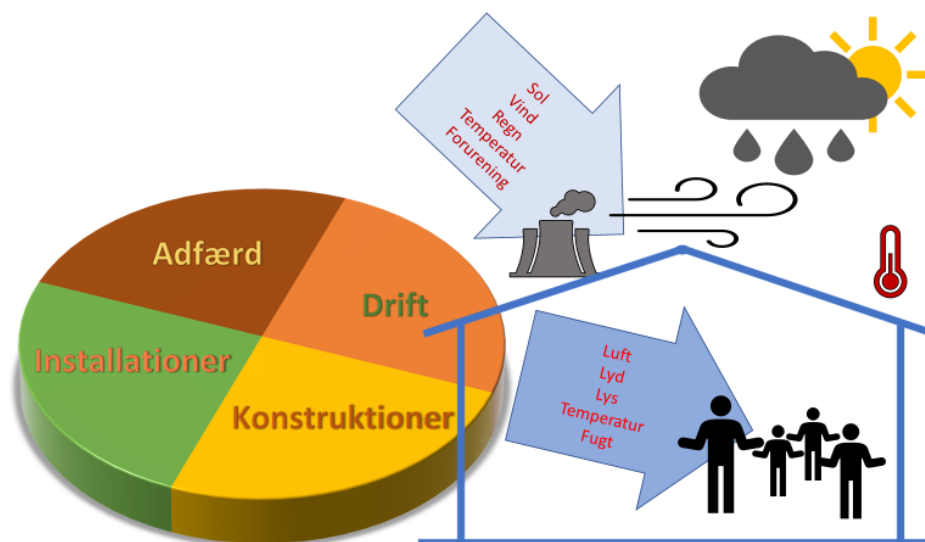
bygningsreglement baseres alene på måleværdierne. Denne mulighed er der åbnet for i demonstrationsprojekterne, gennem kommunale dispensationer fra kravet om, at der ikke må være nogen hjemme, når ventilationen sænkes. Dispensationerne er givet med forbehold om at tilfredsstillende luftkvalitet opretholdes og løbende kan dokumenteres i indeklimatemålinger. Figur 2 viser princippet for at kunne behovstilpasse alene baseret på, at der skal være god luftkvalitet.



Figur 2. Der er i demonstrationsprojekterne givet dispensation til alene at opfylde kravet til tilfredsstillende luftkvalitet for at tillade behovstilpasning af ventilationen under $0,3 \text{ l/s m}^2$. Tegning: Lars Gunnarsen.

Proces og implementering i henhold til boligrenovering

Princippet med at tænke ventilation i behovstilpassede zoner bygger på erfaringer fra kontorer og skoler. De aktuelle løsninger er dog anderledes, da det drejer sig om små zoner – lejligheder – hvor driftspersonale ikke har adgang til lokaler og udstyr. Både bygningen som helhed og de forskellige bygningsdeles udformning, materialer og stand er afgørende for mulige løsninger og implementeringshensyn. På den tekniske side afhænger valg af ventilationsløsning af det eksisterende system, kanalføring, placering, adgangsforhold samt klimaskærmens tæthed (Jensen, Lindholm & Mikkelsen 2016). Økonomi, drifts- og hverdagspraksisser er sociale og organisatoriske aspekter, der også skal tænkes ind i valg af løsning. Brugere af et ventilationsanlæg i en bolig vil være både driftspersonale og beboere, og deres kompetencer og interesser vil have betydning for deres brug af både styringsteknologi og data. Ved renovering rekonfigureres bygningen og dens samling af indbyrdes afhængige systemer, som brugerne skal finde ud af at bruge – for et nyt ventilationsanlæg kan det indebære overvejelser om, hvorvidt vinduesventilering kan fortsættes, og hvem der skal skifte filtrene (Øien 2017). For lejerne indgår ventilationsteknologien som en del af deres hverdagsliv, hvor tidligere erfaringer, personlige kompetencer og interesser har betydning for, hvordan de modtager og interagerer med teknologien (Vogelius 2022). Figur 3 sammenfatter dette samspil omkring indeklimaets påvirkninger.



Figur 3. Indeklimaets påvirkninger som resultat af bygningsdrift, beboeradfærd, installationer og konstruktioner samt ydre påvirkninger. Tegning: Lars Gunnarsen.

Formål

Hovedformålet med projektet er at:

- beskrive konceptet behovstilpasset/behovsstyret udsugningsventilation samt formidle og analysere erfaringer fra det gennemførte demonstrationsprojekt (målinger og interviews)
- undersøge indeklima, energiforbrug og økonomi i denne type af ventilationsløsning
- diskutere alternative former for varmegenvinding, der kan suppleres med behovsstyret udsugningsventilation.

Projektet skal give almene boligafdelinger, private udlejere, rådgivere, udførende og leverandører af installationskomponenter et ajourført grundlag for beslutninger om at anvende behovsstyret ventilation i forbindelse med renoveringer og nybyggeri.

Punkterne er besvaret gennem tre empiriske nedslagspunkter præsenteret i denne rapport:

- resultater fra et års drift af henholdsvis behovsstyret ventilation og balanceret ventilation i to ens bygninger med hver 15 lejligheder med fortløbende målinger af indeklima, varme- og elforbrug, luftmængder samt lokale vejrprognoser, LCA-beregning samt erfaringsopsamling fra boligorganisationen ved interviews med beboere og projektleder – kapitel 5
- modelberegning og simulering af forskellige ventilationsløsninger med fokus på energi og økonomi – kapitel 6
- vurdering af mulige alternative former for varmegenvinding – kapitel 7.

Denne rapport er sammen med den tidligere udgivne indkøbsvejledning den første foreløbige rapporteringer fra projektet. Der er yderligere to demonstrationsprojekter, der befinder sig forskellige steder i de respektive renoveringsprocesser. For at udnytte den læringsværdi, der ligger i løbende at dele og diskutere erfaringerne i disse projekter, benyttes en drypvis rapportering.

3 BEHOVSSTYRET UDSUGNINGSVENTILATION

Behovsstyret udsugningsventilation er for boliger et nyt princip. Der er to centrale forhold, der gælder for det nye princip:

1. Udluftningen styres og varieres i den *enkelte lejlighed* med VAV-spjæld i køkken og bad ud fra det ønskede luftskifte. Dette sker, ved at en cloudtjeneste beregner det aktuelle behov for udeluft fortløbende. Behovet er beregnet ud fra målinger af temperatur, luftfugtighed og CO₂-koncentration i lejligheden, analyser af den bagvedliggende forurening samt lokale vejrprognoser. Formålet er at sikre et godt indeklima med mindst muligt luftskifte og energitab.
2. Det dobbelte rørsystem i *balanceret* ventilation erstattes af et kanalsystem alene med udsugningskanaler med udsugning fra vådrum og tilførsel af udeluft via åbninger mod det fri i øvrige rum. Disse åbninger skal udformes, så trækgener minimeres. Det kan ske, ved at luften føres ind i forbindelse med radiatorer, ved brug af ventilationsvinduer eller blot ved placering af åbningerne højt i rummene. Udsugningsluften kan eventuelt bruges som varmekilde i mindre anlægstunge former for varmegenvinding. Hovedparten af besparelsen sikres dog, ved at luftskiftet løbende tilpasses de aktuelle behov i hver lejlighed, hvorved unødvendig ventilering og det medfølgende energitab fjernes.

Når cloudtjenesten ud fra målinger og analyser konkluderer, at behovet for udeluft falder, sendes styresignaler, som reducerer luftskiftet i lejlighedens styrbare udsugningsspjæld (VAV-spjæld). Det kan fx være, når lejligheden er tom og ikke har særlige fugtbelastninger, eller beboerne har åbnet vinduer. Omvendt kan høj aktivitet medføre et øget luftskifte. Hvis beboerne selv bidrager ved udluftning, bliver det registreret, og den udsugede luftstrøm bliver automatisk reduceret.

Behovsstyring af forskellige zoner i en bygning er ikke en ny løsning, da det er udbredt i kontorer og undervisningslokaler med kraftigt varierende belastninger. Her er det dog ofte løsninger med balanceret ventilation, der forsynes med udstyr, så luftskiftet i det enkelte lokale kan tilpasses det aktuelle behov, typisk baseret på målinger.

Det nye er, at princippet anvendes til boliger, alene med kanaler for udsugning, med brug af cloud og algoritmer til at analysere indeklimamålinger og lokale vejrdata og opbygge en model af den bagvedliggende forurening i de enkelte boliger. En sidegevinst er, at indeklima og energiforbrug automatisk bliver logget og dokumenteret.

Udsugning med fjernstyrede VAV-spjæld

Kernen i behovsstyret udsugningsventilation er et traditionelt trykstyret udsugningsanlæg for en opgang eller hel bygning. Trykstyringen sikrer et konstant undertryk i kanalerne, uanset ændringer i de enkelte spjæld i lejlighederne. Det centrale ventilationsanlægs evne til at opretholde et ensartet undertryk under varierende luftmængder er afgørende, fordi det betyder, at spjæld i de enkelte lejligheder kan køre op og ned, uden at det påvirker luftskiftet i de øvrige lejligheder.

I de enkelte lejligheder installeres en cloudopkoblet indeklimamåler og to styrbare spjæld (VAV-spjæld) – ét i køkken og ét i bad. I ejendommen installeres en internettilsluttet boks,

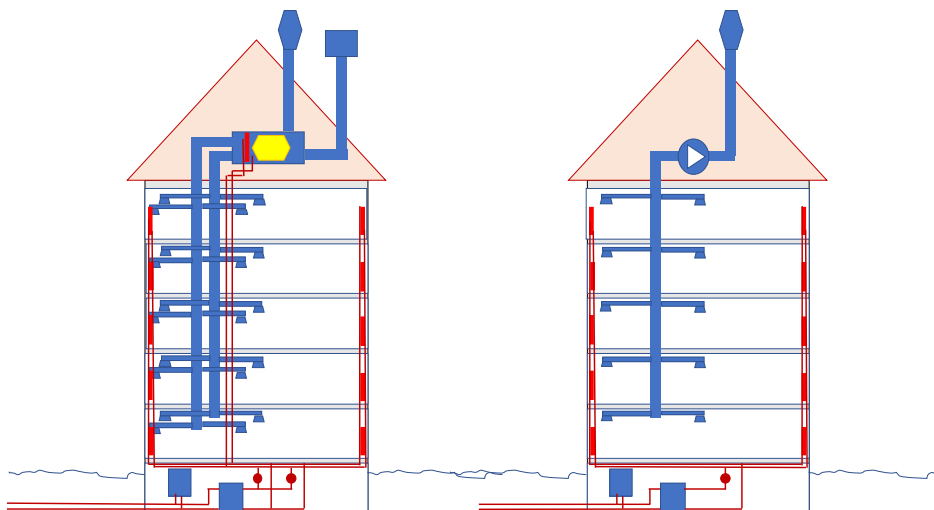
som sikrer kommunikationen mellem cloud og VAV-spjæld, så de kan styres og overvåges. Boksen kommunikerer trådløst med internettet, men er forbundet med ledninger til de enkelte VAV-spjæld.

Midt i hver lejlighed installeres en indeklimatemåler, som måler temperatur, relativ fugt og CO₂ hvert femte minut. Målingerne sendes trådløst til cloudløsningen, hvor de analyseres i forhold til udeluftens aktuelle temperatur og fugt og en adaptiv model af den bagvedliggende produktion af CO₂ og vanddamp.

Der anbefales herudover en føler (bevægelsessensor) til detektion og automatisk opregulering af luftskiftet ved brug af toilet og/eller bad.

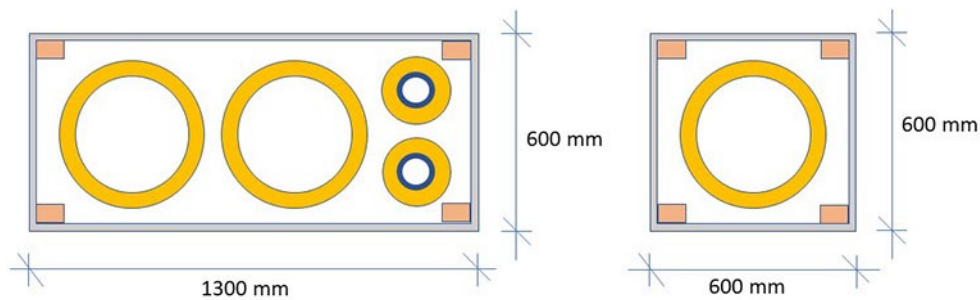
I bilag 1 er det faglige grundlag for behovsstyring dokumenteret med en beskrivelse af, hvordan indeklimatemålinger i kombination med lokale vejrprognoser kan anvendes til avanceret prognosestyring. Styringen sikrer et ønsket indeklima med et minimalt luftskifte.

Figur 4 viser de principielle forskelle mellem balanceret mekanisk ventilation og behovstilpasset udsugningsventilation i etageboliger. I det fjernvarmeforsynede teknikum ses varmtvandsbeholder, varmeveksler og blandesløjfer til varmeanlægget.



Figur 4. Snit gennem to bygninger med boliger i fem etager. Til venstre har bygningen balanceret mekanisk ventilation, og til højre behovstilpasset udsugningsventilation. Tegning: Lars Gunnarsen.

Figur 5 viser størrelsen på de nødvendige installationsskakte ved henholdsvis balanceret mekanisk ventilation og behovstilpasset udsugningsventilation, hvor installationerne i skaktene betjener fem lejligheder. Der er medregnet to lag gips, brandisolering af kanalerne på 50-60 mm og en respektafstand på 50 mm. Forskellen mellem de to ventilationsprincipper giver en forskel i det nødvendige areal til skakte på ca. 0,42 m² pr. lejlighed.



Figur 5. Til venstre vandret snit i skakten med ventilationskanaler og rør til varmtvand til varmepladen i anlægget med balanceret mekanisk ventilation. Til højre den mindre skakt til ventilationskanalen til behovstilpasset udsugningsventilation. Tegning: Lars Gunnarsen.

Friskluftindtag

Ved behovstilpasset udsugningsventilation kommer frisk luft ind i lejligheden via ventiler i facaden til de enkelte lejligheder. Placering af friskluftindtag skal minimere træk og kuldegener. Typisk placeres friskluftindtag bag ved radiator, i vinduer eller tæt på loft. Figur 6 viser friskluftindtag i ydermur som i renoveringen i Sallinghus. Der findes også løsninger, hvor den friske luft føres ind i boligen via perforerede loftplader – en løsning hentet fra kontorer og skoler.



Figur 6. Friskluftindtag i ydermur i Sallinghus, hvor den kolde luft forvarmes, før den distribueres rundt i lejligheden. Billedet er gengivet med tilladelse fra Purmo Group Denmark ApS.

Styring af luftskifte fra cloud

VAV-spjældene modtager hvert femte minut signal om ønsket luftmængde og giver respons om faktisk luftskifte. I rækkehuse og enfamilieboliger vil VAV-spjældene kunne erstattes med styrbare ventilatorer.

Cloudtjenesten opbygger en model for hver lejligheds produktion og bortskaffelse af henholdsvis CO₂ og fugt ved at sammenligne inde- og udeklima. Resultatet er en instruks om det nødvendige luftskifte, som opdateres hvert femte minut. Styreordrer sendes til de enkelte VAV-spjæld.

Der opereres med separate algoritmer for CO₂ og fugt, hvor de to parallelle beregninger resulterer i hver sin bestilling af ønsket luftmængde i den enkelte lejlighed for de nærmeste fem minutter. Det højeste bud vinder og sendes som styreordre til de to spjæld i lejligheden. Samtidig giver spjældene feedback om eventuelle afvigelser mellem seneste luftbestilling og faktisk målt luftskifte. Dette bruges til kalibrering af model samt alarmer, der af driftspersonalet kan bruges til fejlfinding.

Styrekonceptet skal sikre det nødvendige luftskifte for at opretholde et godt indeklima ud fra nogle grænser, som den driftsansvarlige har sat. Automatikken bag behovsstyret udsugningsventilation er bestemt af en række styringsalgoritmer, der er sat til at håndtere det aktuelle behov og samtidig undgå overventilering med dertilhørende energispild. Disse algoritmer er afgørende for mulighederne for at optimere indeklimaet og opnå de estimerede besparelser i luftskifte og energiforbrug, jf. resultaterne fra Højstrupparken. Det er vigtigt i den forbindelse at forstå, at vigtigheden af algoritmerne medtager den bredest mulige samling af muligheder for optimeret ventilation, herunder at beboerne selv lufter ud.

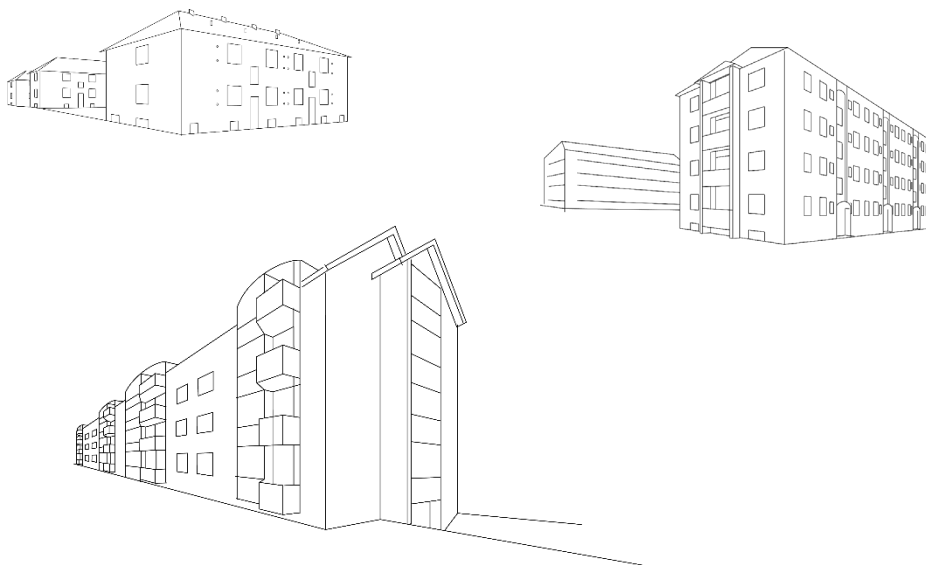
I bilag 1 beskrives et forslag til styringsalgoritmer, herunder samspillet mellem indeklima og udeklima og kommunikation med VAV-spjæld.

4 METODE

Fra 2016 har Landsbyggefonden i samarbejde med en række boligafdelinger og Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD) på Aalborg Universitet initieret tre demonstrationsprojekter med henblik på at blive klogere på de aktuelle muligheder og udvikle hensigtsmæssige ventilationsløsninger ved renovering af ældre etagebyggerier. Et af formålene med demonstrationsprojekterne har været at fremme udviklingen af standardiserede koncepter for effektive og billige ventilationssystemer, hvor dokumenteret indeklima og faktisk energiforbrug er en integreret del af løsningerne.

Cases – de tre demonstrationsprojekter

For at samle et erfaringsgrundlag omkring behovsstyret udsugningsventilation er undersøgelserne baseret på tre renoveringsprojekter i ældre etageejendomme. Det primære feltarbejde i denne rapport blev udført sommer og efterår 2022. På det tidspunkt var løsningen implementeret i Højstrupparken, mens renoveringen i Solhusene var under udførelse, og Sallinghus var under projektering. Bebyggelserne er skitseret i figur 7.

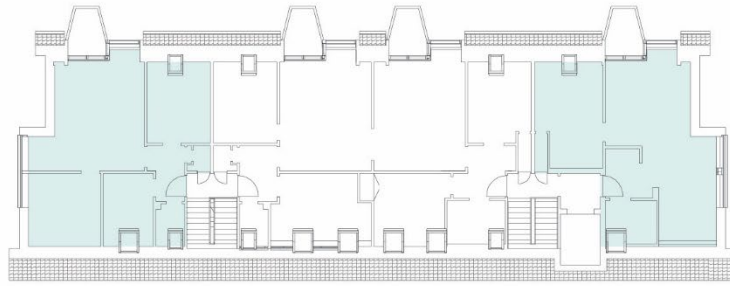


Demonstrationsprojekter

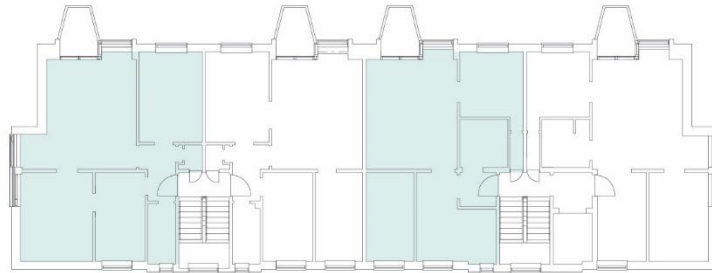
Figur 7. De tre demonstrationsprojekter. Tegning: Turid Borgstrand Øien.

Det første demonstrationsprojekt er Højstrupparken i Odense (FAB), som har haft behovsstyret ventilation i drift siden sommeren 2021. I rapporten sammenlignes ventilationsløsninger i to identiske blokke med hver 15 lejemål. Etageplaner ses i figur 8.

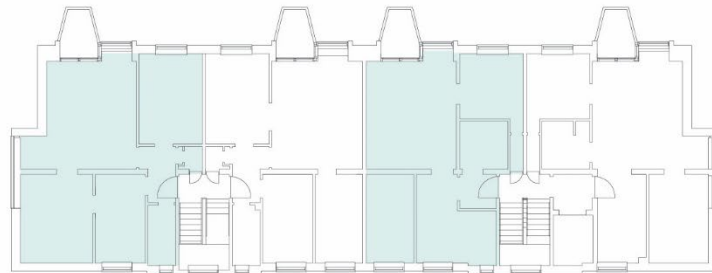
3. sal



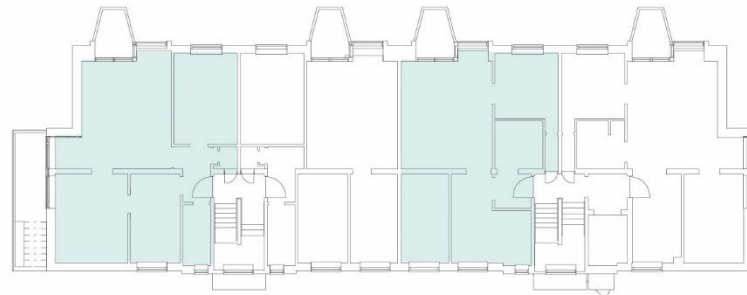
2. sal



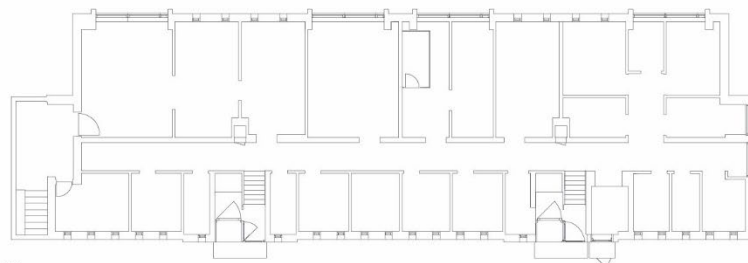
1. sal



stue



kælder



Figur 8. Etageplaner for Blok B3 og C2 i Højstrupparken. Tegningsgrundlag: ERIK Arkitekter.

Blok B3 er udført med behovsstyret udsugningsventilation uden varmegenvinding, og nabobygningen samt Blok C2 med traditionel balanceret ventilation med varmegenvinding. De to blokke er en del af en større renovering, der blev afsluttet i 2021.

Hertil kommer de to øvrige demonstrationsprojekter, Solhusene i Albertslund (Bo-Vest), hvor behovsstyret ventilation blev sat i drift i efteråret 2023, og Sallinghus i København (SAB/KAB), der får etableret behovsstyret ventilation i løbet af 2024.

De tre projekter er vedtaget før de to ændringer i BR18, beskrevet på side 12-13, men lovliggjort gennem kommunale dispensationer. For projekterne gælder disse to væsentlige forudsætninger, der ikke kan genfindes i det reviderede bygningsreglement:

- behovsstyret ventilation ned til 0,15 l/s m² uden krav om fravær af beboere
- fritagelse fra krav om varmegenvinding ud over energibesparelse som følge af mindre luftskifte.

De to blokke i Højstrupparken

I bygningen med behovsstyret ventilation er der etableret fælles udsugning via fjernstyrede VAV-spjæld i køkken og bad samt friskluftindtag bag ved radiatorer i de enkelte rum. Styringsalgoritmerne her er baseret på principperne beskrevet i bilag 1. Et centralt, trykstyret udsugningsanlæg sikrer konstant undertryk i de centrale udsugningskanaler. VAV-spjæld i udsugningen fra henholdsvis køkken og baderum justerer den udsugede luftstrøm. De er tilsluttet styrebokse, som samtidig står i forbindelse med cloudservice. I hver lejlighed er der installeret en indeklimatemåler, som måler temperatur, relativ fugtighed og CO₂.

Cloudtjenesten beregner behovet for udsuget luftstrøm med fem minutters interval ud fra indeklimatemålinger, lokale vejrdata samt feedback fra VAV-spjæld.

Med henblik på at sammenligne indeklimaet for de to typer af ventilation er der samtidig installeret indeklimateålere i lejlighederne i referencebygningen med konstant decentral balanceret ventilation.

I begge bygninger er der installeret fjernaflæste varme- og elmålere for at dokumentere de energimæssige forhold ved de to ventilationsløsninger. Varmemålerne måler alene varme til rumopvarmning og ventilation (og ikke til varmt brugsvand). Elmålerne måler alene elforbruget i ventilationsanlæggene.

Monitorering af indeklimate og energiforbrug

I Højstrupparken har der været opsat indeklimateålere i samtlige lejligheder i de to blokke, og varme- og elforbrug er aflæst hver måned. Der er udført flere forskellige analyser på baggrund af disse måledata, herunder sammenlignende analyse af måledata for luftkvalitet over en enkelt måned for behovsstyret udsugningsventilation (Højstrupparken, Blok C2), naturlig ventilation (Sallinghus) og konstant balanceret mekanisk ventilation (Toftemarken). Her blev en anden referencecase for konstant balanceret mekanisk ventilation inddraget, da Blok B3 er udført med decentrale anlæg, og ønsket for analysen var sammenligning med centralt anlæg. Herudover sammenlignes måledata for indeklimate (CO₂, relativ fugt og temperatur) og luftskifte for de to blokke over det første driftsår (august 2021-juli 2022) henholdsvis for målinger i stue og soveværelse. Herudover er der suppleret med måledata for hele 2022 og 2023.

Varme- og elforbrug er ligeledes analyseret for de to blokke – både for det første driftsår samt for de efterfølgende driftsår, 2022 og 2023.

Livscyklusvurdering for Højstrupparken

Metoden for livscyklusvurderingen vil i det følgende blive kaldt klimaberegning, da vi udelukkende beregner det miljøproblem, der hedder globalt opvarmingspotentiale (GWP). Klimaberegningen bliver i videst mulige omfang udført i henhold til de gældende klimakrav i BR18. Da klimakravene ikke omfatter renoveringer, anvendes følgende justeringer.

Energiberegningen er baseret på det målte forbrug i perioden august 2021 til juli 2022. Se tabel 7 og 8 med nærmere beskrivelse i afsnittet *Energiforbrug og -regning* på side 34. Varmeforbruget er ikke klimakorrigeret, hvorfor energiens klimapåvirkning ikke kan generaliseres ud over den specifikke varmesæson. Derudover blev varmfeforbruget målt for hele boligblokken, mens elforbruget kun stammer fra ventilationsanlægget. Disse metodiske valg skaber et robust sammenligningsgrundlag mellem de to ventilationsløsninger, men er ikke egnet til at vise de typiske klimapåvirkninger fra energiforbruget efter en sådan renovering. Begge blokkes boligstruktur, tæthed af klimaskærmen og eksisterende energimæssig ydeevne antages i øvrigt at være sammenlignelige. Historiske forskelle i energiforbruget kunne have øget datagrundlaget, men de har ikke været tilgængelige.

Den afgrænsede måling af ventilationens elforbrug giver ligeledes et godt grundlag for at måle forskelle i de to systemer.

Klimapåvirkning for forbrug af el og fjernvarme er beregnet med de nyeste emissionsfaktorer, der skal gælde i bygningsreglementet fra 2025 (Artelia 2023). Dette valg har stor betydning for resultatet og konklusionen, da de gældende emissionsfaktorer i tabel 8 i bygningsreglementets bilag 2 (COWI 2020) er væsentligt højere. Det betyder, at klimapåvirkningen for energi er stærkt faldende, og dermed forøges det relative bidrag fra materialer i klimaberegningen. For at tillade en fremadskuende betragtning er 2025 valgt som startår. Emissionsfaktorer er fremskrivninger af den forventede klimapåvirkning mellem 2025 og 2050 i femårsintervaller, der tager højde for den planlagte omstilling af energiforsyningen til vedvarende energiproduktion. De manglende årstal er blevet bestemt ved lineær interpolation, og emissionsfaktorer for 2050 forventes ikke at ændre sig frem mod 2074, hvor betragtningsperioden over 50 år slutter. Den gennemsnitlige klimapåvirkning for 1 kWh el og fjernvarme er henholdsvis 0,0298 og 0,0155 kgCO₂e/kWh i beregningerne.

Påvirkninger for materialer er beregnet ud fra den mængde materiale i ventilationssystemet, som fremgår af BIM-modellerne fra rådgiver. Klimaberegningen af materialerne er udført for livscyklusmoduler for produktion (A1-3), udskiftninger (B4) og endt levetid (C3-4). Som ved energi beregnes klimapåvirkninger fra materialer ved at multiplicere den samlede installerede materialemængde af et produkt (fx ventilationskanaler) med en emissionsfaktor for produktets klimapåvirkning. Der anvendes kun generiske miljødata fra BR18, bilag 2, tabel 7.

Med en vis usikkerhed forventes det også, at klimapåvirkninger for produktion og genanvendelse af materialer vil falde i takt med den teknologiske udvikling. Der er dog ikke enighed om størrelsesordenen for enkelte produkter, og denne betragtning er endnu ikke med i bygningsreglementets metode. En sådan betragtning ville reducere påvirkninger fra udskiftninger og affaldsbehandling. Mere relevant er, at udskiftning af filtre ikke er med. Denne proces tilhører modul B2 i henhold til EN 15978 og er derfor endnu ikke en del af bygningsreglementets afgrænsning. Filtre kan udgøre en betydelig andel af ventilationsanlæggets klimapåvirkninger set over 50 år. Filtre findes kun i balancerede ventilationsanlæg, hvis årlige udskiftninger kan have en andel af ventilationsanlæggets klimapåvirkning på 15-24 % efter henholdsvis BUILD-rapport (Balouktsi & Birgisdottir 2023) og et kandidatspeciale fra Aalborg Universitet (El Hamid, Stramarko & Heckova 2022).

Kvalitative interviews og besøg

Der er gennemført en række kvalitative interviews i relation til demonstrationsprojekterne. I Højstrupparken er der gennemført interviews med beboere i en af de lejligheder, hvor der er

implementeret behovsstyret ventilation, samt med projektleder fra FAB Franz Leitner. Begge interviews blev gennemført med udgangspunkt i en semistruktureret interviewguide udarbejdet på forhånd med henblik på det aktuelle i forhold til informanter og kontekst. Højstrupparken har været en del af det Realdania-støttede initiativ *Be Ready*, der undersøger energirenoveringernes effekt på indeklimaet. Som i to andre energirenoveringer i henholdsvis Trigeparken i Aarhus og i Gladsaxe er der lavet indeklimatemålinger og kvalitative interviews med beboerne i forbindelse med renoveringen. Da resultaterne fra denne undersøgelse endnu ikke var publiceret, blev der som forberedelse til det videre feltarbejde lavet et interview med to af projektets forskere omkring de foreløbige resultater. Ud over disse foregående indeklimateundersøgelser tog interviewet med projektleder udgangspunkt i projektmateriale for renoveringen og en analyse af byggeriet fra Teknologisk Institut (Madsen, Søvsø & Draborg 2016). Interviewet blev gennemført i FAB's lokaler i Odense og drejede sig om initiering og implementering af de behovsstyrede ventilationsløsninger samt samarbejde med de forskellige parter i renoveringsprojektet (entreprenør, rådgiver og beboere).

Beboerinterviewet blev gennemført i deres aktuelle bolig og tog udgangspunkt i de fysiske løsninger i boligen. Første del af samtalen foregik siddende ved spisebordet og omhandlede processerne omkring renoveringen, herunder ventilationsløsningerne. Anden del af interviewet blev gennemført ved gennemgang, demonstration og observation af boligens forskellige rum med særlig fokus på luftindtag, sensorer og ventilationsåbninger, herunder også beboernes forståelse, oplevelse og praksisser omkring deres indeklima før og efter renoveringen. Husstandens to beboere var til stede ved interviewet, men det var primært den ene part, der indgik som informant, og dennes informerede samtykke for fotografier og udsagn blev indhentet. Alle interviews er transskriberet og suppleret med feltnoter.

Herudover er der gennemført interviews med professionelle aktører i de to andre demonstrationsprojekter, Sallinghus og Solhusene. Da renoveringen i disse bebyggelser endnu ikke var gennemført, er der ikke her gennemført beboerinterviews. Målet har været at få input vedrørende den generelle initiering og implementering af de valgte ventilationsløsninger og samarbejdet mellem byggeriets professionelle aktører. Ved Solhusene er der gennemført telefonisk interview med projekteringsleder, og ved Sallinghus er der gennemført telefonisk interview med projektchef fra KAB. Herudover er der udført feltbesøg i Sallinghus i oktober 2022 med gennemgang af den mock-up, der var udført på dette tidspunkt. Projektdeltager Carsten Fløe Sørensen, der har stået for rapportens økonomiske beregninger, er desuden rådgiver på Sallinghus og har bidraget med viden om de aktuelle løsninger i denne case. Disse interviews indgår primært som diskussion og perspektivering af Højstrupparkens resultater.

Sallinghus

Grundlaget for de teoretiske beregninger, der er lavet for Sallinghus, kan deles op i henholdsvis forudsætninger for luftmængder og forudsætninger for driftstider.

Luftstrømme

Forudsætninger for luftstrømmene er for balanceret mekanisk ventilation i henhold til BR18's krav om 0,3 l/s pr. m² samt forcering til 15 l/s for bad og 20 l/s for køkken. Ved kanaldimensionering regnes med en samtidighed på baggrund af antal lejligheder tilsluttet hvert anlæg på 75 % for den forcerede luftmængde i forbindelse med brug af emfang.

I beregningerne for behovsstyret udsugning i Sallinghus er forudsat en minimumsluftstrøm på 6,1 l/s i overensstemmelse med den kommunale dispensation til

projektet svarende ved den gennemsnitlige boligstørrelse på 68 m² til 0,09 l/s m², når indeklimamålingerne ikke indikerer øget ventilationsbehov. Denne lidt lave minimumsluftstrøm er oprindeligt fastsat på baggrund af rapporten *Resultater og erfaringer fra energirenovering af Ryesgade 30* (EUDP Sekretariatet 2014). Den laveste luftstrøm antages at forekomme inden for almindelig arbejdstid i dagtimerne inkl. transport til og fra arbejdspladsen, da det forventes, at mange boliger står tomme i det givne tidsrum.

Den maksimale luftmængde er sat til en summering af bad og køkken på i alt 35 l/s, som er ekskl. emhætte, da den styres individuelt og derfor fungerer uafhængigt i forhold til den behovsstyrede udsugning. De 35 l/s varieres i relation til den enkelte lejligheds størrelse for opfyldelse af minimum 0,3 l/s pr. m². Den højeste forekommende luftmængde antages at forekomme i aften timerne omkring madlavning og aftensmadstid.

De beregningsmæssige luftmængder for behovsstyret ventilation under de øvrige perioder for almindeligt ophold om morgenen samt om aftenen (ekskl. madlavning) og i forbindelse med nattesøvn er opdelt i to perioder for henholdsvis *øget ventilering, aktivitet* og *øget ventilering, hvile*. *Øget ventilering, aktivitet* sker i forbindelse med almindeligt ophold om morgenen og om aftenen og er sat til et gennemsnit på 25 l/s. *Øget ventilering, hvile* sker i forbindelse med nattesøvn og er sat til 15 l/s.

Til sammenligning vil der for den gennemsnitlige lejlighedsstørrelse på ca. 68 m² for Sallinghus ved 0,3 l/s pr. m² være 20 l/s. Der gives en skematisk oversigt i tabel 12-20 i kapitlet *Sallinghus – beregninger af forbrug*.

Driftstider

Forudsætninger for driftstiderne for det balancerede mekaniske ventilationsanlæg er opdelt i en grundbelastning og en forceret ventilering, hvor grundbelastningen udgør de 95 % af tiden eller 22,8 timer/døgn. Forceret luftmængde udgør de resterende 5 % af tiden eller 1,2 timer/døgn i forbindelse med madlavning og aftensmad.

Forudsætninger for behovsstyret udsugning sker med driftstid, hvor personer ikke er til stede, på 10 timer/døgn, *øget ventilering, hvile* i forbindelse med nattesøvn på otte timer/døgn, *øget ventilering, aktivitet* i forbindelse med almindeligt ophold op morgenen og om aftenen på 4,8 timer/døgn samt forceret drift i forbindelse med madlavning/aftensmad på 1,2 timer/døgn.

Der henvises igen til den skematiske oversigt i kapitel *Sallinghus – beregninger af forbrug*.

Ovenstående forudsætninger for luftstrømme og driftstider vurderes ifølge projektgruppen at danne grundlag for de teoretiske beregninger i forlængelse af den kommunale dispensation for Sallinghusdemonstrationsprojektet, velvidende at disse forudsætninger afviger fra de gældende regler i bygningsreglementet ved denne rapports udarbejdelse.

Anlægsberegninger

Udtræk af elforbruget for aggregat samt boksventilator er sket ved brug af luftmængderne angivet herover, hvilket vil sige to beregninger for balanceret mekanisk ventilation (grundventilering og forceret) samt fire beregninger for behovsstyret udsugning (grundventilering, *øget ventilering, hvile*, *øget ventilering, aktivitet* og forceret). For alle typer af anlæg er der taget udgangspunkt i kendte fabrikater forhandlet i Danmark. Der er anvendt oplysninger fra to specifikke producenter i beregningen for henholdsvis balanceret mekanisk ventilation og behovsstyret udsugning, og beregningerne kan således i nogen grad give andre resultater ved brug af produkter fra andre producenter. Der er regnet med luft/vand-varmepumpeanlæg bestående af en udsugningsventilator samt varmepumpe for varmegenvinding i forbindelse med afkastet fra behovsstyret udsugning.

Værdier udtrukket fra producenternes anlægsoplysninger er videreført til beregning af det samlede forbrug for henholdsvis balanceret mekanisk ventilation og behovsstyret udsugning på baggrund af ovenstående driftstider og luftstrømme.

Der er ved beregning af varmepumpeanlægget taget udgangspunkt i en varmepumpe med lille kompressorstørrelse ved et maksimalt fremløb begrænset til 60 °C for forsyning af regulært radiatoranlæg i Sallinghus udlagt for 60/30 °C.

Der regnes med et årligt brugsvandsforbrug på 250 l/m², et transmissionstab på 30 W/m² efter efterisolering af facader, udskiftning af vinduer samt nyetableret tagrum og en indvendig rumtemperatur på 20 °C.

Derudover er balanceret ventilation regnet for en maksimal SEL-faktor på 1,2 kJ/m³ i henhold til BR18, hvor hvert behovsstyret udsugningsanlæg er regnet for en maksimal SEL-faktor på 0,6 kJ/m³, ligeledes ifølge BR18. Det er ved nærmere eftervisning beregnet, at SEL-faktorer forventeligt vil ligge lavere. I denne redegørelse regnes der dog med de maksimale tilladte krav i henhold til BR18.

Varmeforbruget er beregnet efter en gennemsnitlig årlig udetemperatur på 8,1 °C, jf. dansk referenceår, TRY (Andersen m.fl. 1982), og en indendørs temperatur på 20 °C indendørs, jf. DS 418. Økonomiberegningerne baseres på energipriser medio 2022.

Workshop

I juni 2022 arrangerede projektgruppen en innovationsworkshop ved BUILD med fokus på nytænkning af varmegenvinding i forhold til behovstilpasset ventilation og problemformuleringen: "Kan energiindholdet i varm og fugtig afkastluft udnyttes eller distribueres på en ny måde svarende til varmegenvinding for størrelsesmæssigt 25 % af afkastluften?" Workshopen havde 13 deltagere i form af rådgivere, forskere, projektledere fra det almene byggeri og produktudviklere. Demonstrationsprojekterne dannede rammen for de videre gruppediskussioner om alternativer til varmegenvinding. Idéer blev til sidst præsenteret og diskuteret i plenum.

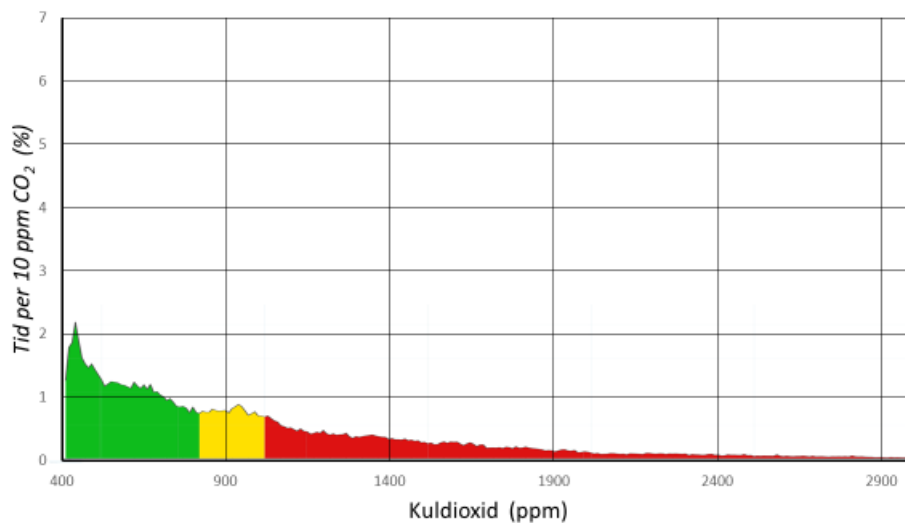
Læs mere om mulige former for varmegenvinding i kapitel 7.

5 HØJSTRUPPARKEN – ERFARINGSOPSAMLING OG MÅLINGER

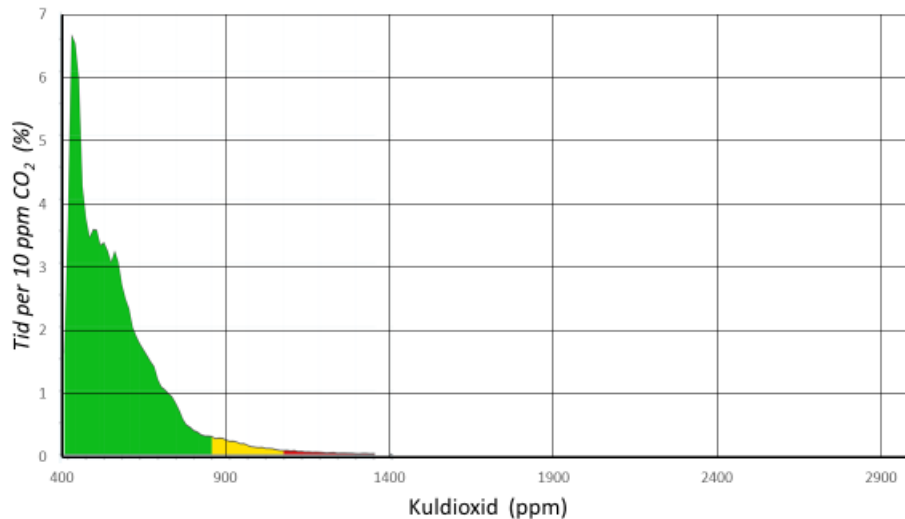
I denne del beskrives og analyseres erfaringerne fra Højstrupparken, hvor behovsstyret udsugningsventilation er implementeret i et udsnit af et større renoveringsprojekt, hvor der ellers er installeret balanceret ventilation. Sammenligningen af de to ventilationsystemer sker ved analyser af de to identiske bygninger, der ligger side om side, hvor den ene har behovsstyret ventilation, og den anden balanceret ventilation.

Måledata

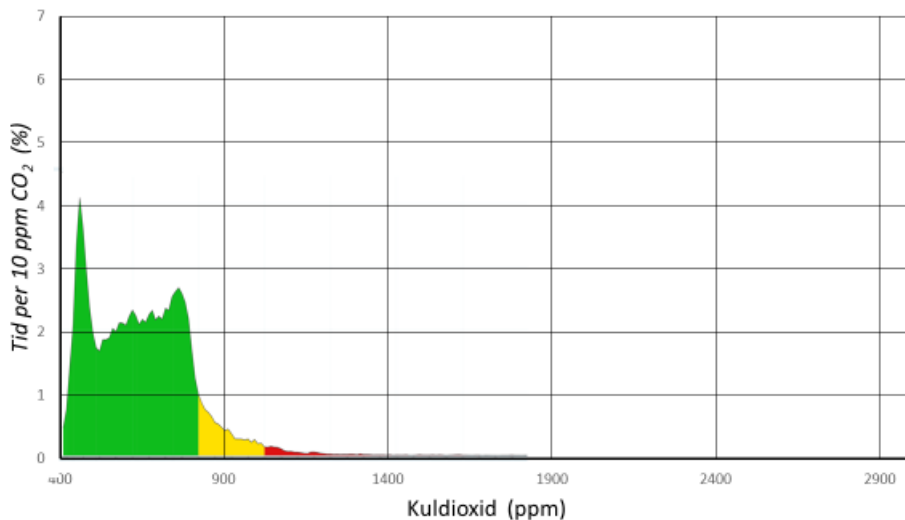
Målingerne fra Højstrupparken er sammenholdt med målinger i to referencecases, Sallinghus og Toftemarken. Varighedskurver for CO₂-koncentrationen (kuldioxid) i lejligheder med henholdsvis naturlig, konstant balanceret og behovstilpasset ventilation er vist i figur 9, 10 og 11. Der ses en høj forekomst af høje CO₂-koncentrationer i de naturligt ventilerede boliger, som ikke genfindes ved konstant balanceret og behovstilpasset ventilation. Indeklimaet i bygningen med behovsstyret ventilation i Højstrupparken adskiller sig ikke meget fra indeklimaet i bygningerne i Toftemarken, der har fået balanceret mekanisk ventilation i 2018 efter en renovering. Det er dog tydeligt, at den høje forekomst af meget lave CO₂-koncentrationer i Toftemarken indikerer perioder med overventilering.



Figur 9. Varighedskurve for koncentrationen af kuldioxid i etageboliger med naturlig ventilation. Baseret på januar 2019 i Sallinghus og 35 lejligheder.



Figur 10. Varighedskurve for koncentrationen af kuldioxid i etageboliger med konstant balanceret ventilation. Baseret på januar 2019 i Toffemarken og 60 lejligheder – medtaget her som reference.



Figur 11. Varighedskurve for koncentrationen af kuldioxid i etageboliger med behovstilpasset mekanisk udsugningsventilation. Baseret på januar 2022 i Højstrupparken og 15 lejligheder.

Ved behovsstyret ventilation er andelen af målinger over 1.000 ppm² (rød) 2 %, mens 8 % ligger mellem 800 og 1.000 ppm (gul) i januar 2022. De tilsvarende procentsatser er 3 % og 9 % ved referencen, balanceret ventilation. I løbet af året er billedet det samme; andelen af høje – uønskede – værdier er marginalt højere for balanceret ventilation.

Resultaterne indikerer, at det er muligt at sikre en god luftkvalitet med et mindre samlet luftskifte.

I figur 10 og 11 kan effekten af styringen aflæses. CO₂-koncentrationer på op til ca. 700 ppm håndteres ved lavt luftskifte. Omvendt øges luftskiftet, når cloudtjenestens prognoser forudser, at forureningsgraden nærmer sig de valgte setpunkter. Figur 10 illustrerer, at der i forbindelse med balanceret ventilation er et stort antal målinger i intervallet 400-500 ppm,

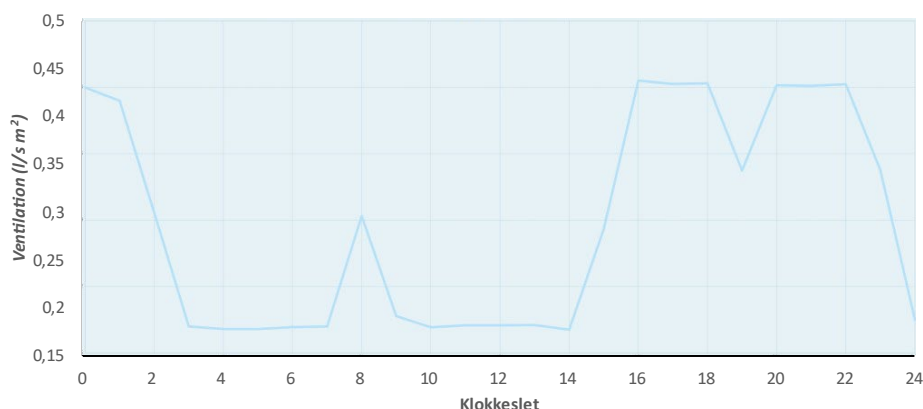
² PPM (part pr. million). 1.000 ppm betyder fx, at der er 1 l CO₂ pr. 1 m³ luft.

hvilket indikerer et unødvendigt højt luftskifte i forhold til figur 11 med den behovstilpassede løsning.

Luftmængder

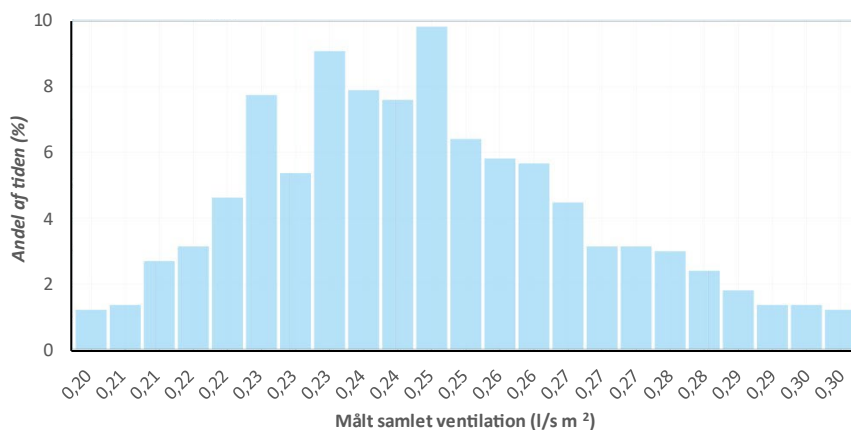
Styreordre og faktisk luftskifte i alle VAV-spjæld registreres i cloud for hver time. Det giver mulighed for at analysere den relative fordeling af det målte samlede luftskifte i en måned, samtidig med at det indgår i selve styringen og som alarm, hvis fx VAV-spjældene bliver blokeret.

I figur 12 vises luftskiftet over døgnet i en lejlighed. Bemærk særligt det lave luftskifte i løbet af dagen og det markant forhøjede luftskifte sidst på dagen, hvor luftskiftet overstiger $0,3 \text{ l/s m}^2$.



Figur 12. Luftskiftets fordeling over døgnet i én lejlighed.

I figur 13 vises det samlede luftskifte pr. time for alle 15 lejligheder med behovsstyret ventilation for en måned. Lejlighedernes gennemsnitlige areal var 79 m^2 . Det gennemsnitlige luftskifte er på $0,25 \text{ l/s m}^2$, hvor det samlede luftskifte er på $0,29 \text{ l/s m}^2$ og derover i mindre end 10 % af tiden.



Figur 13. Det gennemsnitlige luftskifte fordelt i timeværdier over et døgn målt i februar 2022 i Højstrupparken, Blok B3 (ejendom med behovsstyret ventilation).

Den behovsstyrede ventilation har mulighed for at hæve luftskiftet i de enkelte lejligheder til ca. $0,45 \text{ l/s m}^2$, men som figuren illustrerer, opstår behovet for meget højt luftskifte med lille samtidighedsfaktor. Det betyder, at anlæggene kan håndtere stor forurening i de enkelte lejligheder, uden at der stilles ekstra kapacitetskrav til den centrale udsugning.

Analyse af indeklimaet i stue og soveværelse med forskellige ventilationssystemer

Dette afsnit beskriver analyser af indeklimaet i stue og soveværelse med henholdsvis balanceret og behovsstyret ventilation i de to identiske og nyrenoverede boligblokke, hvor der har været opsat indeklimate målere i både stue og soveværelse. Afsnittet afsluttes med en opsummering af de vigtigste resultater og konklusioner om målte forskelle i de to bygninger.

Formålet var at dokumentere indeklimaet i soveværelser generelt og helt specifikt at undersøge, om behovsstyret ventilation baseret på én indeklimate måler placeret centralt i boligen, i dette tilfælde i boligens største rum, kan sikre et godt indeklima i lejlighedens soveværelse. Der er målt med femminuttersintervaller og dataopsamling i cloud.

Desuden undersøges det, om temperaturen i soveværelset generelt er lav. I den forbindelse minder vi om, at ventilationsstyringen ikke forsøger at justere temperaturen, men blot anvender temperaturmålingerne til omregning fra relativ til absolut luftfugtighed (g/m^3), der bruges i styrealgoritmerne.

Driftsdata fra det første år viser, at det gennemsnitlige luftskifte i bygningen med behovsstyret ventilation er ca. det halve af luftskiftet i ejendommen med balanceret ventilation. I det følgende sammenlignes måleværdier for CO_2 , relativ fugt og temperatur for de to ventilationssystemer i stue og soveværelse.

To ens ejendomme med henholdsvis balanceret og behovsstyret boligventilation

De to ens ejendomme har hver 15 lejligheder med et gennemsnitligt bruttoareal på $75 m^2$, hvoraf soveværelset er på knap $10 m^2$.

Den balancerede ventilation forsyner alle rum med forvarmet frisk luft. Der opereres med et fast indreguleret luftskifte på 35 l/s, hvilket svarer til, at der udsuges 20 l/s fra køkkenet og 15 l/s fra badeværelset, og at der er et luftskifte på ca. 0,47 l/s m^2 bruttoareal. Hertil kommer infiltration via utætheder i klimaskærmen, hvilket for balanceret ventilation, jf. SBI-213 (Aggerholm, 2018), skønnes at udgøre ca. 0,1 l/s m^2 .

I den *behovsstyrede* ventilation trækkes udeluft ind i lejligheden via ventiler i vægge og vinduer, men også utætheder i klimaskærm og åbne vinduer mv. Det betyder, at den supplerende infiltration uden om denne ventilationsløsning er marginal.

I de følgende tabeller vises CO_2 -koncentration, relativ luftfugtighed og temperatur for de to bygninger med henholdsvis balanceret og behovsstyret ventilation.

Indeklimaet i lejlighedernes største rum

I tabel 1 vises fraktilværdier for CO_2 -koncentration i lejlighedernes største rum, hvorfra styringssignalerne blev hentet, opdelt i fem fraktiler. Desuden vises andelen af tiden, der faldt i de tre klasser: grøn, gul og rød. Tabellen er baseret på målingerne foretaget i Højstrupparken i november 2021. Der var opsat i alt 30 målere, og alle leverede måledata for den ene måned.

TABEL 1. Den målte CO_2 -koncentration i lejlighedernes største rum, hvorfra styringssignalerne blev hentet, opdelt i fem fraktiler. Desuden vises andelen af tid fordelt på de tre klasser: grøn, gul og rød.

	CO ₂ -koncentration (ppm) i fraktiler					% af tiden i interval for CO ₂ -koncentration		
	5 %	25 %	50 %	70 %	95 %	< 800 ppm	800-1.000 ppm	> 1.000 ppm
Balanceret ventilation	426	518	599	731	984	84	12	4
Behovsstyret ventilation	421	491	614	725	885	90	8	2

Resultaterne svarer til resultaterne fra Højstrupparken præsenteret først i kapitlet. Den balancerede ventilation har flere målinger *over 1.000 ppm* – 4 % vs. 2 % – og også flere i intervallet 800-1.000 ppm – 12 % vs. 8 %. Omvendt er fordelingen nogenlunde ens for lavere CO₂-koncentrationer. De 4 % og 2 % i rød klimaklasse svarer til, at CO₂-koncentrationen i gennemsnit for lejlighederne er for høj i det største rum, dvs. over grænsen på 1.000 ppm i henholdsvis 1 og 0,5 time pr. døgn.

Bemærk også, at den behovsstyrede ventilation er lidt bedre til at undgå høje værdier for CO₂ med et luftskifte, som i gennemsnit er det halve i forhold til den balancerede løsning.

I tabel 2 vises fraktilerne for den relative luftfugtighed i lejlighedernes største rum i bygning med henholdsvis balanceret og behovsstyret ventilation og den procentuelle andel af tiden i de tre intervaller:³ grøn: 20-50 % RH, gul: 50-60 % RH og rød: > 60 % RH.

TABEL 2. Den målte relative luftfugtighed i lejlighedernes største rum, hvorfra styringssignalerne blev hentet, opdelt i fem fraktiler. Desuden vises andelen af tiden, der faldt i de tre klasser: grøn, gul og rød.

	Relativ luftfugtighed (% RH) i fraktiler					% af tiden i interval for relativ luftfugtighed		
	5 %	25 %	50 %	70 %	95 %	20-50 % RH	50-60 % RH	> 60 % RH
Balanceret ventilation	33	39	43	47	53	95	5	0
Behovsstyret ventilation	29	33	36	40	44	100	0	0

Der er det samme mønster for relativ luftfugtighed som for CO₂. Forklaringen på, at behovsstyret ventilation er bedre til at undgå høje fugt- og CO₂-koncentrationer, er som nævnt, at VAV-spjældene justerer luftskiftet op, når værdierne for fugt og CO₂ stiger eller er høje, hvilket fjerner væsentligt mere forurening pr. ventileret m³ end ved en fast luftmængde uafhængigt af forureningsniveauet.

Indeklimamålinger i soveværelse

I tabel 3 vises fraktilværdier for CO₂-målinger i soveværelser i bygningerne med henholdsvis balanceret og behovsstyret ventilation. Der var opsat i alt 30 målere, hvoraf 27 leverede måledata for november 2021.

TABEL 3. Den målte CO₂-koncentration i lejlighedernes soveværelser er opdelt i fem fraktiler. Desuden vises andelen af tiden, der faldt i de tre klasser: grøn, gul og rød.

	CO ₂ -koncentration (ppm) i fraktiler					% af tiden i interval for CO ₂ -koncentration		
	5 %	25 %	50 %	70 %	95 %	< 800 ppm	800-1.000 ppm	> 1.000 ppm
Balanceret ventilation	401	436	545	720	1.154	80	10	10
Behovsstyret ventilation	412	474	585	756	1.374	79	10	11

Her er CO₂-koncentrationerne generelt højere, sammenlignet med lejlighedernes største rum. For de to ventilationsløsninger er andelen af målinger over 1.000 ppm ens, ca. 10 %, og det samme gør sig gældende for intervallet 800-1.000 ppm. Ud fra fraktilgrænserne ses det, at de meget høje CO₂-koncentrationer er mere almindelige i soveværelser med behovsstyret ventilation.

³ Klimagrænserne for relativ fugt er her angivet for vinterperioden. Gul klasse omhandler desuden relativ luftfugtighed i intervallet 15-20 % og rød < 15 %. Der var dog ingen målinger i den lave ende i november 2021.

Sammenligningen viser, at den behovsstyrede ventilations forspring i forhold til balanceret ventilation er indhentet, når vi går fra det største rum – som leverer indeklimamålinger til ventilationsstyringen – til soveværelset, hvor indeklimamålingerne ikke indgår i styringen.

Selvom målingerne måske ikke er alarmerende, med ca. 10 % af målingerne over 1.000 ppm, kan der være grund til at overveje forskellige løsninger, der forøger ventilationen i de mindre rum med mere indirekte behovsstyring.

I tabel 4 vises tilsvarende fraktilværdier for relativ luftfugtighed i soveværelser i bygningerne med henholdsvis balanceret og behovsstyret ventilation.

TABEL 4. Den målte relative luftfugtighed i lejlighedernes soveværelser opdelt i fem fraktiler. Desuden vises andelen af tiden, der faldt i de tre klasser: grøn, gul og rød.

	Relativ luftfugtighed (% RH) i fraktiler					% af tiden i interval for relativ luftfugtighed		
	5 %	25 %	50 %	70 %	95 %	20-50 % RH	50-60 % RH	> 60 % RH
Balanceret ventilation	33	39	44	48	55	83	16	1
Behovsstyret ventilation	35	41	44,7	50	57	75	23	2

Den balancerede ventilation er bedre til at holde den relative luftfugtighed på et lavt niveau i soveværelset. Dette kan sammenlignes med, at den behovsstyrede ventilation var bedst til at holde luftfugtigheden nede i lejlighedernes største rum (hvor indeklimamåleren er placeret). 1-2 % af målingerne ligger i klimaklasse rød, hvilket vil sige en relativ luftfugtighed på over 60 %. 2 % af tiden svarer til ca. 0,5 time pr. dag fordelt på alle lejlighederne.

Sammenligning af indeklimamålinger i stue og soveværelse

Forskellen på CO₂-målingerne mellem stue og soveværelse for lejligheder med balanceret ventilation kan aflæses ved at sammenholde tabel 1 og 3.

Den balancerede ventilation leverer nogenlunde ens CO₂-koncentrationer i de to rumtyper helt op til 75 % fraktilen, hvor koncentrationen tilmed er lavere i soveværelse sammenholdt med stue. Derimod har soveværelserne en *markant* højere andel af de rigtigt høje CO₂-koncentrationer, hvor 5 % af alle målinger er over 1.154 ppm. Tilsvarende er 10 % af målingerne i soveværelserne i rød klimaklasse, hvilket vil sige over 1.000 ppm, mens det kun er 4 % for stuen.

Forskellen mellem relativ fugtighed i stue og soveværelser for den behovsstyrede ventilation ses ved at sammenholde tabel 2 og 4. Mønsteret fra CO₂-målingerne går igen, om end den balancerede ventilation her er lidt bedre til at holde den relative luftfugtighed nede. Den store forskel er i det gule interval, med en relativ luftfugtighed på 50-60 % RH.

De høje værdier giver anledning til et ønske om et øget luftskifte i soveværelset. Dette bør være muligt, eftersom det indreguleres og dermed er rimeligt simpelt at forøge andelen af forvarmet udeluft til de mindste værelser i de tilfælde, hvor målingerne påviser kritisk høje værdier for CO₂ og/eller relativ luftfugtighed.

De store variationer i relativ luftfugtighed og CO₂-koncentration ved balanceret ventilation illustrerer omvendt, at der er et betydeligt potentiale for at reducere luftskiftet i begge rum i en stor del af døgnet og året, uden at det går ud over indeklimaet.

Tabel 1 dokumenterede, at CO₂-koncentrationerne var nogenlunde ens i de store rum, uanset om der var balanceret eller behovsstyret ventilation. I begge tilfælde var mindre end 5 % af målingerne over 1.000 ppm.

Omvendt ses det ved at sammenholde tabel 1 og 3, at der er væsentligt større forskel i CO₂-koncentrationen mellem stue og soveværelse i bygningen med behovsstyret ventilation.

Den behovsstyrede ventilation har populært sagt tabt sit forspring, når vi skifter fokus fra stue til soveværelse.

Mønsteret fra CO₂-målingerne for behovsstyret ventilation gentager sig i målingerne af relativ fugtighed, som fremgår af tabel 2 og 4, med noget større forskelle i relativ fugtighed, når indeklimaet i stue og soveværelse sammenholdes. Bemærk, at i soveværelserne er den relative fugt klart højere i alle fraktilværdier. Det indikerer for det første, at der kun i meget begrænset grad er udluftning i soveværelserne, samt at den behovsstyrede ventilation i den aktuelle bygning trækker for lidt luft fra soveværelserne.

Den behovsstyrede ventilation optimerer luftsiftet i stuen ud fra data fra én indeklimamåler, som netop er placeret her. Det fungerer fint, når produktion og CO₂-koncentration og fugt er nogenlunde jævnt fordelt mellem lejlighedernes rum, og luften frit kan cirkulere mellem rummene. Om natten, hvor CO₂- og fugtproduktion er rykket ind i soveværelset, stiger koncentrationerne som en konsekvens af, at rummet er lille og har reduceret luftudveksling til øvrige rum i lejligheden.

Den mangelfulde ventilation i soveværelset med 10 % af målingerne, der overskrider grænsen på 1.000 ppm, kan løses på forskellige måder, der præsenteres sidst i dette afsnit under opsummeringen.

Målt temperatur i stue og soveværelse

I forbindelse med måling af CO₂ og relativ fugt måles automatisk temperatur til brug for omregning mellem relativ og absolut luftfugtighed. Det gav mulighed for at vurdere, om soveværelser generelt har en anden temperatur end den øvrige bolig.

Der fremføres tit en hypotese om, at mange beboere ønsker en lavere temperatur i soveværelset end i den øvrige bolig. Der er også fremsat en formodning om, at en del beboere lader vinduet i soveværelset stå åbent i løbet af dagen og/eller natten for at få frisk luft ind. Målingerne i de knap 30 lejligheder kan vise, om dette gælder for den aktuelle boligafdeling.

Ventilationssystemerne har ikke til formål at påvirke lufttemperaturen, men de kan påvirke den indirekte. Ved balanceret ventilation sendes forvarmet udeluft ind i boligen, mens der ved behovsstyret ventilation trækkes kold udeluft ind. Den kølende effekt ved behovsstyret ventilation kompenseres, ved at radiatorerne leverer ekstra varme. Det er vigtigt, at de er dimensioneret til denne ekstra varmeydelse.

I tabel 5 vises en fordeling for målt temperatur i lejlighedernes soveværelser. Klimagrænser⁴: grøn: 18-21 °C, gul: 21-23 °C og rød: > 23 °C. I tabel 6 vises en tilsvarende fordeling for målt temperatur i lejlighedernes stuer.

TABEL 5. Den målte temperatur i lejlighedernes soveværelser opdelt i fem fraktiler. Desuden vises andelen af tiden, der faldt i de tre klasser: grøn, gul og rød.

	Temperatur (% RH) i fraktiler					% af tiden i interval for temperatur		
	5 %	25 %	50 %	70 %	95 %	18-21 °C	21-23 °C	> 23 °C
Balanceret ventilation	19,3	20,9	21,8	22,4	23,3	28	62	10
Behovsstyret ventilation	17,8	20,1	21,5	22,3	23,4	34	57	9

⁵ https://bygningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/11/Krav/297_298#d578ff9b-87e2-42aa-8d81-a08f60c9b3d1

TABEL 6. Den målte temperatur i lejlighedernes største rum opdelt i fem fraktiler. Desuden vises andelen af tiden, der faldt i de tre klasser: grøn, gul og rød.

	Temperatur (% RH) i fraktiler					% af tiden i interval for temperatur		
	5 %	25 %	50 %	70 %	95 %	18-21 °C	21-23 °C	> 23 °C
Balanceret ventilation	19,7	21,2	22,0	22,7	25,2	21	60	19
Behovsstyret ventilation	18,4	21,2	22,0	22,7	23,7	19	65	16

Bemærk, at 25 %-fraktilen i soveværelserne ligger på henholdsvis 20,9 og 20,1 °C, hvilket dokumenterer, at beboerne i de to ejendomme ikke har en særligt lav temperatur i soveværelserne. Der er store ligheder mellem temperaturfordelingen i de målte soveværelser i bygninger med henholdsvis balanceret og behovsstyret ventilation.

De målte temperaturer i soveværelser med balanceret ventilation er knap 0,5 grad under temperaturer målt i stuer. Forskellen er markant størst for de høje temperaturer, hvor antallet af målinger over 23 °C kun er halvt så stort i soveværelser.

Også for den balancerede ventilation ser vi, at temperaturen er ca. 0,5 grad lavere i soveværelser, og at soveværelserne har knap halvt så mange målinger over 23 °C som stuerne. Bemærk, at 75 % af alle målinger ligger over 20 °C.

Opsummering

Formålet med mekanisk ventilation er at sikre et tilfredsstillende luftskifte til at opretholde et godt indeklima og samtidig begrænse trækgener og unødvendigt energiforbrug. Eftersom beboerne og deres aktiviteter er den primære forureningskilde, varierer belastningen kraftigt over tid. Hertil kommer, at en eventuel for høj CO₂-koncentration i boligen primært er en udfordring for mennesker – ikke for det faste inventar. Altså kan der rimeligvis være fordele ved løbende at tilpasse luftskiftet til den forurening, som beboerne afgiver med deres tilstedeværelse og aktiviteter.

Hyppek måling af indeklima – CO₂, relativ fugt og temperatur – er en forudsætning for behovsstyret ventilation. Målingerne giver sammen med feedback fra VAV-spjæld desuden en række interessante informationer om det faktiske indeklima og luftskifte. De udførte målinger af indeklimaet i soveværelser med henholdsvis balanceret og behovsstyret ventilation viser, at indeklimaet, målt som CO₂ og relativ fugt, er lidt ringere i soveværelser sammenholdt med boligens største rum. Mest kritisk er, at andelen af målinger, som overskrider grænsen på 1.000 ppm, stiger fra henholdsvis 4 og 2 % i stuer til 10 % i soveværelser. Andelen af høje værdier for relativ fugt stiger tilsvarende, men andelen af målinger med en luftfugtighed over 60 % er dog kun henholdsvis 1 og 2 %.

Balanceret ventilation opererer med en fast høj luftmængde svarende til BR's kapacitetskrav, mens behovsstyret ventilation kan justere luftstrømmen ned under kapacitetskravene. Ved behovsstyret ventilation sikres det gennem målinger, at indeklimaet er i orden, ved løbende at justere ventilationen i overensstemmelse med målingerne og derved stadig opretholde et tilfredsstillende indeklima.

Indeklimaet i soveværelserne er stort set ens for de to ventilationssystemer. Det betyder, at den relative fordel, som behovsstyret ventilation kunne dokumentere i lejlighedernes største rum, er tabt, når vi måler i boligens øvrige rum. Den behovsstyrede ventilation optimerer luftskiftet i stuen ud fra data fra en indeklimamåler, som netop er placeret her. Det fungerer fint, når produktion og CO₂-koncentration og fugt er nogenlunde jævnt fordelt i lejlighedens rum, og luften frit kan cirkulere mellem rummene. Om natten, hvor CO₂- og fugtproduktionen er rykket ind i soveværelset, stiger koncentrationerne som en konsekvens af, at rummet er lille, og luftudvekslingen muligvis er reduceret, hvis døren er lukket til de øvrige rum i lejligheden.

Behovsstyret boligventilation blev lanceret med en hypotese om, at én indeklimatemåler i lejligheden var tilstrækkelig. Luften i en lejlighed cirkulerer, som følge af at udsugningsventiler i køkken og bad skaber et undertryk, og frisk luft trækkes ind via ventiler og utætheder i de øvrige rum, samtidig med at lejlighedens indretning skal sikre, at luft nemt kan bevæge sig mellem de enkelte rum, jf. BR-krav. Ph.d. Rune Korsholm Andersen fra Center for Indeklima og Energi på DTU analyserede i 2013 brugen af indeklimateålere i etageboliger (Andersen 2013). En af konklusionerne var, at én måler placeret centralt i boligen gav et rimeligt mål for indeklimaet i alle rummene i mindre og mellemstore lejligheder. I større lejligheder samt boliger med flere etager er der imidlertid behov for flere målere.

Resultatet af denne analyse af indeklimatemålinger i stue og soveværelse i to bygninger i Højstrupparken peger i samme retning. Indeklimaet i mindre og mellemstore lejligheder – som overholder krav om intern luftudveksling mellem rum – er generelt nogenlunde ens i bygninger med velfungerende ventilation. Forudsætningen er, at den balancerede ventilation fordeler frisklufttilførslen i de enkelte rum, og tilsvarende, at behovsstyret ventilation etablerer og fordeler friskluftindtag i alle rum på en hensigtsmæssig måde. Bemærk, at små soveværelser er en særlig udfordring, hvor der kan være behov for supplerende tiltag. Fordelingen af udeluft mellem lejlighedernes rum skal netop tage højde for, at en stor del af boligens CO₂- og fugtproduktion er knyttet til soveværelser, som generelt er små.

Den enkleste løsning på ovenstående er at ændre cloudstyringens parameterværdier, så luftskiftet hurtigere opreguleres, især om natten. En anden mulighed er justering af vægventiler i soveværelset, så luftmodstanden reduceres, da udsugningsanlæggets undertryk i lejligheden automatisk vil opprioritere luftveje med mindst modstand. Man kunne også tænke sig en løsning, hvor beboerne manuelt kunne justere vægventilerne, når de gik i seng. Blandt de mere omkostningstunge løsninger er hvor indeklimateålere i både stue og soveværelse, kobles op på styringen. Der kan også etableres ventilationsåbninger mellem soveværelse og gang og eventuelt ind til øvrige værelser for at sikre god intern udveksling (jf. BR-krav).

Målingerne af temperatur i soveværelserne i de to bygninger har medianværdier på henholdsvis 21,8 °C og 21,5 °C, hvilket ikke umiddelbart underbygger hypotesen om, at soveværelser holdes særligt kolde om dagen eller natten med åbne vinduer. Medianværdierne er henholdsvis 0,5 °C og 0,2 °C lavere end i stuen for balanceret og behovsstyret ventilation. Standardafvigelsen er mindst for den balancerede ventilation, hvor der indblæses forvarmet frisk luft. I kun ét af soveværelserne med balanceret ventilation var gennemsnitstemperaturen under 20 °C. For den behovsstyrede ventilation er spredningen i måleværdier generelt større, hvortil kommer, at tre af lejlighederne har en gennemsnitstemperatur på under 20 °C.

Tallene fra denne ene boligafdeling kan dog ikke bruges som dokumentation for at afvise hypotesen om lavere temperatur i soveværelset sammenlignet med de øvrige rum. I lyset af at vi tilbringer ca. 1/3 af døgnets timer i soveværelser, vil det være oplagt at gentage denne type af måling i flere boligafdelinger.

Energiforbrug og energjudgifter

Tabel 7, 8 og 9 viser varme- og elforbrug i to næsten ens bygninger med henholdsvis behovsstyret og balanceret ventilation for det første hele driftsår, august 2021 til juli 2022. Bemærk, at vi her sammenligner behovsstyret ventilation *uden* varmegenvinding med balanceret ventilation *med* varmegenvinding.

TABEL 7. Energiforbrug ved behovsstyret ventilation uden varmegenvinding i Højstrupparken, Blok B3, 2021-2022. Baseret på omregningsfaktorer til primærenergi på 1,9 og 0,85 for henholdsvis el og fjernvarme samt energipriser på el: 3,00 kr./kWh og fjernvarme: 0,75 kr./kWh.

Måned	Rumvarme MWh	Elventilation MWh	Sum energi vægtet MWh	Sum energjudgift kr.
August	1,076	0,044	0,998	938
September	2,6552	0,066	2,382	2.189
Oktober	8,139	0,0797	7,070	6.343
November	12,045	0,0613	10,355	9.218
December	17,807	0,0643	15,258	13.548
Januar	16,409	0,00728	14,086	12.525
Februar	14,1	0,0607	12,100	10.757
Marts	11,275	0,0657	9,709	8.653
April	7,746	0,0558	6,690	5.977
Maj	2,53	0,0668	2,277	2.098
Juni	1,297	0,0644	1,225	1.166
Juli	1,023	0,0659	0,995	965
Årssum	96,102	0,767	83,144	74.378

TABEL 8. Energiforbrug ved balanceret ventilation med varmegenvinding i Højstrupparken, Blok C2, 2021-2022. Baseret på omregningsfaktorer til primærenergi og energipriser som vist i tabel 7.

Måned	Rumvarme MWh	Elventilation MWh	Sum energi vægtet MWh	Sum energjudgift kr.
August	1,79	0,136	1,779	1.750
September	3,413	0,292	3,457	3.437
Oktober	6,992	0,211	6,343	5.876
November	10,641	0,204	9,432	8.593
December	16,042	0,213	14,040	12.670
Januar	14,551	0,214	12,775	11.555
Februar	12,6	0,186	11,063	10.008
Marts	9,141	0,202	8,154	7.462
April	6,426	0,206	5,854	5.439
Maj	2,192	0,211	2,264	2.276
Juni	2,241	0,205	2,294	2.296
Juli	1,513	0,210	1,685	1.765
Årssum	87,542	2,490	79,141	73.125

TABEL 9. Besparelse ved behovsstyret ventilation sammenlignet med balanceret ventilation. Negative værdier indikerer, at der bruges mere energi ved balanceret ventilation.

Måned	Sum energi vægtet MWh	Sum energjudgift kr.
August	0,782	812
September	1,074	1.248
Oktober	-0,726	-468
November	-0,922	-625
December	-1,218	-879
Januar	-1,311	-970
Februar	-1,037	-749
Marts	-1,555	-1.192
April	-0,836	-538
Maj	-0,014	179
Juni	1,070	1.130
Juli	0,690	800
Årssum	-4,003	-1.253

Vægtning af energiforbruget i forhold til beregning af det samlede tilførte energibehov (primærenergiforbruget) skal ifølge BR18 ske med følgende faktorer: el: 1,9 og fjernvarme: 0,85. Kravene til henholdsvis centrale og decentrale anlæg tillader nu kun 20 % mere elforbrug i de centrale anlæg.

Tabel 10 viser en sammenstilling for Højstrupparkens varmeforbrug (ekskl. varmt brugsvand) samt elforbrug til ventilation.

TABEL 10. Forbrug til rumvarme og elektricitet i de to renoverede boligblokke med hver 15 lejligheder i Højstrupparken. Desuden er elforbruget vist justeret for den fiktive opbygning med central balanceret ventilation svarende til BR18's accept af 20 % større elforbrug i centrale anlæg.

	Rumvarme MWh	Elforbrug ventilation MWh	Vægtet energiforbrug MWh
Behovsstyret udsugningsventilation	96,102	0,767	83,1
Balanceret ventilation, decentral	87,542	2,490	79,1
Balanceret ventilation, central (beregnet forbrug)	87,542 (uforandret)	2,988	80,1

Varmeforbruget ved behovsstyret ventilation uden varmegenvinding er 10 % højere end ved balanceret ventilation med varmegenvinding. Omvendt er elforbruget 70 % lavere. Det samlede vægtede energiforbrug ved behovsstyret ventilation er 5 % højere end ved balanceret ventilation. Hvis man beregningsmæssigt kompenserer for, at man i Højstrupparken har valgt decentrale anlæg til balanceret ventilation og forøger elforbruget svarende til centrale anlæg med 20 %, reduceres forskellen i vægtet primært energiforbrug til 4 %.

Hvis den behovsstyrede ventilation skal have et energiforbrug på niveau med balanceret ventilation, skal der introduceres varmegenvinding, som kan hente de sidste 5 %. Det svarer fx til, at 25 % af afkastluftens energiindhold udnyttes til energiformål.

De to løsninger har stort set ens energiregninger. Den samlede energiregning til varme og elektricitet (til ventilationsanlæg) er således kun 2 % højere for behovsstyret ventilation

uden varmegenvinding. For de 15 lejligheder drejer det sig om en samlet ekstra omkostning på 1.200 kr. svarende til en ekstrabetaling på 7 kr./måned pr. lejlighed.

Den meget begrænsede økonomiske forskel indikerer, at det testede behovsstyrede ventilationskoncept formår at kompensere for den manglende varmegenvinding. Det større varmetab ved ventilation uden varmegenvinding udlignes næsten af behovsstyringen, som medfører et lavere samlet luftskifte og et lavere elforbrug til at drive ventilationen. I kapitlet om varmegenvinding beskrives forskellige former for varmegenvinding, der kan supplere den behovsstyrede ventilation.

I vinterperioden er det primært høje koncentrationer af CO₂, som dikterer luftskiftet, mens det i sommerperioden – og især det tidlige efterår – er høj fugtighed, som begrunder et forøget luftskifte. Det er der to forklaringer på:

- Større CO₂-produktion i boligen om vinteren skaber behov for større luftskifte. Om vinteren opholder vi os en stor del af tiden indendørs og med lukkede vinduer og døre for at spare på energien. Det betyder, at CO₂-forureningen fra mennesker er højere end i sommerhalvåret, hvor vi er mere udenfor og tit lader vinduer og døre stå åbne. Den automatiske styring tager højde for disse forskelle ved at justere luftskiftet for at opnå en acceptabel CO₂-koncentration.
- Beboere og aktiviteter i boligen bidrager til fugtbelastning, som kan bidrage til en høj relativ luftfugtighed i boligen. Om sommeren er den absolutte luftfugtighed i udeluften højere, fordi varm luft kan indeholde mere vanddamp end kold luft. Derfor skal boligen ventileres mere om sommeren for at bortventilere den fugt, der genereres i boligen.

Målinger for 2022 og 2023

Målesystemer og dataopsamling er videreført efter første driftsår rapporteret ovenover (august 2021-juli 2022). I dette afsnit rapporteres for 2022 og 2023.

Behovsstyret ventilation (Blok B3, Bystævnevej 41-43)

Driftsdata for den behovsstyrede ventilation indikerer, at der er sket en ændring/justering i oktober 2022, hvor luftskiftet stiger med ca. 10 % og fastholder et højere niveau i den efterfølgende periode. Dette afføder en betydelig stigning i elforbrug. I det første driftsår var elforbruget til ventilation 767 kWh/år, mens det tilsvarende tal i 2023 var 1.221 kWh/år – dvs. en stigning på knap 60 %.

En hypotese er, at styreboksene fra oktober 2022 ikke systematisk har modtaget styresignaler fra cloudtjeneste. I tilfælde af dataudfald er styreboksene programmeret til, at luftskiftet sættes til en fast værdi, jf. fall back-procedure.

Indeklimaet, dvs. koncentrationen af CO₂ og relativ fugt, er stort set uændret i hele perioden fra 2021 til 2023, hvilket ikke er i modsætning til oplysningerne om en mindre stigning i luftskiftet.

Under det første driftsår (august 2021-juli 2022) var der en fortløbende overvågning af cloudstyring. Grundet leverandørens nedlukning medio 2022 og efterfølgende konkurs var ansvaret for driftsovervågning ikke entydigt placeret. Dette kan være forklaringen på, at der tilsyneladende ikke er taget højde for udfald i datakommunikationen med styrebokse.

Varmeforbruget er stabilt over de tre år.

Balanceret ventilation (Blok C2, Bystævnevej 37-39)

De 15 decentrale balancerede anlæg i referencebygningen blev sat i drift medio 2021, dvs. samtidig med det behovsstyrede anlæg. Her er der etableret måling af el- og varmeforbrug samt indeklima, men ikke luftskifte.

Elforbruget i de decentrale anlæg var stort set uændret i det første og andet driftsår. Målinger dokumenterer samtidig, at elforbruget i 4. kvartal 2022 faldt med ca. 10 % og forblev på et lavere niveau i hele 2023. Elforbruget i 2023 var 10 % under forbruget i det først driftsår.

Der er ikke oplysninger om luftskifte fra de decentrale anlæg. Én hypotese er, at de decentrale anlæg er blevet ind-/nedjusteret.

Indeklimaet i de to seneste år er stort set identisk med det første driftsår, med en vigtig undtagelse: én lejlighed, hvor der i syv måneder er gennemsnitlige CO₂-koncentrationer væsentligt over 1.000 ppm. Det kan indikere, at det pågældende decentrale anlæg ikke har været i drift godt halvdelen af året.

Udfald af ét ud af 15 decentrale anlæg – i et halvt år – kan dog ikke forklare det samlede fald i elforbruget på 10 % for et helt år.

Varmeforbruget er stabilt over de tre år.

Opsamling

Hvis de målte elforbrug i 2022 og 2023 betragtes som udtryk for stabil og overvåget drift, svarer dette til, at forbruget af primærenergi er 8-9 % højere end ved decentral balanceret ventilation og 7-8 % højere end ved central balanceret ventilation. Den manglende reaktion på alarmer om manglende datakommunikation for den balancerede ventilation, og på at minimum ét decentralt balanceret anlæg ikke har leveret frisk luft i mindst syv måneder, giver anledning til at anbefale, at det i analyser af behovsstyret ventilation uden varmegenvinding forudsættes, at det primære energiforbrug stiger med 5 % i forhold til decentral balanceret ventilation og 4 % i forhold til central balanceret ventilation. Forudsætningen herfor er:

- at der opereres med en styring, som sikrer, at luftskiftet fortløbende tilpasses det aktuelle behov for frisk luft med fokus på at minimere luftskifte og energitab maksimalt, samt
- at kommunikation samt måle- og styreenheder overvåges, hvor der hurtigt handles på alarmer for udfald i kommunikation, datahjemtagning eller levering af styreordre.

Livscyklusvurdering

Fra 1. januar 2023 gælder de nye klimakrav i bygningsreglementet (BR18 § 297-298),⁵ som betyder, at der for alle nye bygninger skal udføres en beregning af bygningens klimapåvirkning, og at større bygninger også skal overholde en grænseværdi for påvirkningen. Denne klimaberegning tager hensyn til energiforbrug, men også til andre væsentlige processer i bygningens livscyklus som produktion, udskiftning og affaldsbehandling af materialer efter endt levetid. Klimakravene bygger på metoden livscyklusvurdering efter EN 15978 og tilhørende standarder.

Forskellige ventilationsløsninger adskiller sig ikke kun med hensyn til økonomiske omkostninger, men også i forhold til drivhusgasudledninger fra energiforbrug og materialers livscyklus. Dette afsnit har til formål at sammenligne klimapåvirkningerne fra de to afprøvede varianter af behovsstyret udsugningsventilation i Blok B3 med den balancerede ventilation med varmegenvinding i Blok C2. Med denne beregning ønskes en mere nuanceret miljøvurdering af varianterne ud over en ren betragtning af energiforbrug.

Undersøgelsens formål er at vise forskellen i klimapåvirkning mellem de to ventilationsvarianter, som er installeret og har været i drift i ét år i to identiske boligblokke. Fordi der er tale om to specifikke boligblokke, kan resultatet ikke umiddelbart generaliseres til anvendelse i andre byggesager. Derimod kan fremgangsmåden og dokumentationsniveauet danne præcedens for god praksis i fremtidige undersøgelser.

Resultater

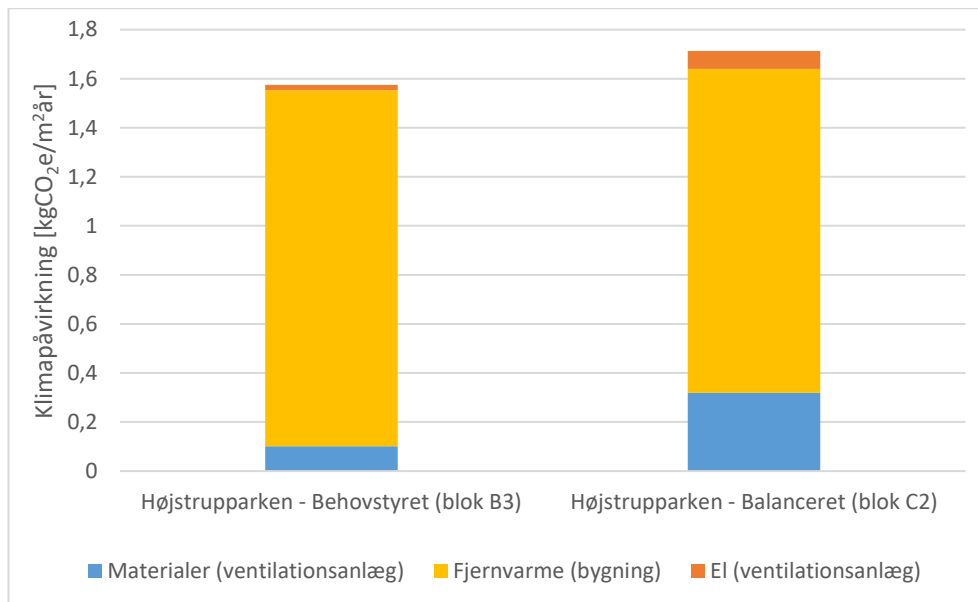
Ifølge energimålinger over et års driftsperiode forbruger den behovsstyrede ventilation 6,66 kWh/m²år mere end varianten; se tabel 11. Den dominerende årsag til dette er det øgede varmeforbrug i forhold til balanceret ventilation med varmegenvinding, som ikke kan opveje besparelsen i elforbrug i det mindre omfattende anlæg.

TABEL 117. Øget energiforbrug ved behovsstyret udsugningsventilation i Højstrupparken.

	Variant	Målt årligt forbrug (kWh/m ² år)	Merforbrug ved behovsstyret udsugningsventilation	
			Varme og el	Total
Fjernvarme (bygning)	Behovsstyret (Blok B3)	93,58	+8,34	+6,66
	Balanceret (Blok C3)	85,25		
El (ventilationsanlæg)	Behovsstyret (Blok B3)	0,75	-1,68	
	Balanceret (Blok C3)	2,42		

Figur 14 viser den samlede klimapåvirkning for energi og materialer for begge løsninger over en 50 års betragtningsperiode. I denne periode indgår produktion af materialer, udskiftninger for komponenter med en kortere levetid end 50 år samt affaldsbehandling efter endt levetid. Derudover indgår energi for en driftsperiode på 50 år. De samlede resultater for materialer og energi er vist i bygningsreglementets enhed for klimapåvirkning, hvor de totale værdier er delt med 50 år og referencearealet, som her er ensbetydende med etagearealet.

⁵ https://bygningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/11/Krav/297_298#d578ff9b-87e2-42aa-8d81-a08f60c9b3d1



Figur 14. Klimapåvirkning af de to ventilationsløsninger over en betragtningsperiode på 50 år. Materialer inkluderer modulerne A1-3, B4 og C3-4 for hele inventaret, som går ud over bygningsreglementets afgrænsning. Energi indeholder varmeforbrug for hele bygningen og elforbrug kun for ventilation. For materialer benyttes bygningsreglementets generiske datagrundlag (BR18 bilag 2, tabel 7), og for energi de kommende generiske emissionsfaktorer, der skal gælde fra 2025.

Varianten med udsugningsventilation har en 9 % lavere klimapåvirkning end den balancerede ventilation (1,57 vs. 1,71 kgCO₂e/m²·år). Selvom energiens klimapåvirkning i udsugningsventilationen udgør 1,47 kgCO₂e/m²·år og dermed 5 % mere end varianten på 1,39 kgCO₂e/m²·år, så ligger de materialerrelaterede påvirkninger 68 % lavere (0,10 vs. 0,32 kgCO₂e/m²·år).

Den dominerende betydning af energi i forhold til materialer skyldes to forhold. For det første har eksisterende bygninger fra før stramningen af energikravene typisk et væsentligt højere forbrug end nye bygninger, og for det andet medtages hele bygningens energiforbrug, som alene sammenholdes med ventilationsanlæggets påvirkninger. Det skal bemærkes, at de anvendte nye emissionsfaktorer for el og fjernvarme er væsentligt lavere end de gældende. Beregningen med de gamle faktorer (0,0468/0,0696 kgCO₂e/kWh for el/fjernvarme) ville føre til det omvendte forhold mellem de to varianter. Det er dog valgt at bruge de nyeste faktorer (0,0155/0,0298 kgCO₂e/kWh for el/fjernvarme) i dette studie med henblik på at støtte aktuelle beslutninger med de mest retvisende forudsætninger, som tager hensyn til energiforsyningens udvikling.

Når man betragter renoveringen alene i forhold til de første år i den kommende livscyklus på 50 år, ville de materialerrelaterede påvirkninger veje tilsvarende tungere end energiforbruget, mens sidstnævntes betydning gradvist ville blive større med årene. Her har det behovsstyrede ventilationsanlæg en endnu større fordel, da det kun vejer ca. en 1/3 sammenlignet med det balancerede ventilationsanlæg. Bilag 2 viser mere uddybende resultater om materialers klimapåvirkninger.

Implementeringserfaringer fra beboere og boligorganisation



Figur 15. Højstrupparken – de 15 boliger i blokken til venstre på billedet har fået installeret behovsstyret ventilation og har sammen med de 15 boliger i blokken bagved med balanceret mekanisk ventilation leveret indeklimadata til undersøgelsen. Foto: Turid Borgstrand Øien.

For at blive klogere på implementeringen af de behovsstyrede ventilationsløsninger i nærværende projekt er der lavet to nedslag:

- besøg og interview hos en af familierne, der har fået ventilationsløsningen installeret
- interview med projektleder fra FAB Franz Leitner omkring initiering og projektsamarbejdet i demonstrationsprojektet.

Erfaringer med ventilation, træk og manglende information

Selvom der generelt har været god kommunikation i forbindelse med selve renoveringsprojektet, har der været meget begrænset information om den behovsstyrede ventilationsløsning. Dette har været en bevidst beslutning fra projektledelsen for at undgå forvirring omkring den ene og den anden løsning.



Figur 16. Armatur for luftindtag. T.v.: filter og styrespjæld for regulering af indtag. T.h.: udeluftventil i facaden. Fotos: Turid Borgstrand Øien.

Uden information har beboerne selv forsøgt at finde ud af, hvordan ventilationen fungerede. En af beboerne oplevede generende træk, dels fra radiatoren i hjemmekontoret og dels som gulvkoldt ved spisebordet i stuen. Dette har været steder, hvor de typisk har siddet stille og hvor opvarmningen af udeluften gennem radiatoren ikke har været tilstrækkelig men har givet trækgener. Beboerne stiller især spørgsmål ved den manglende information: "Vi har intet fået at vide ... Radiatorerne gav ikke så megen varme, når de stod på de tre, men vi turde heller ikke skrue mere op ... Vi vidste vel ikke rigtigt i forhold til det hele ... Der var 22 grader ... Nu er jeg en frossenpind i forvejen, men også når vi havde gæster, kommenterede de kulden ..."



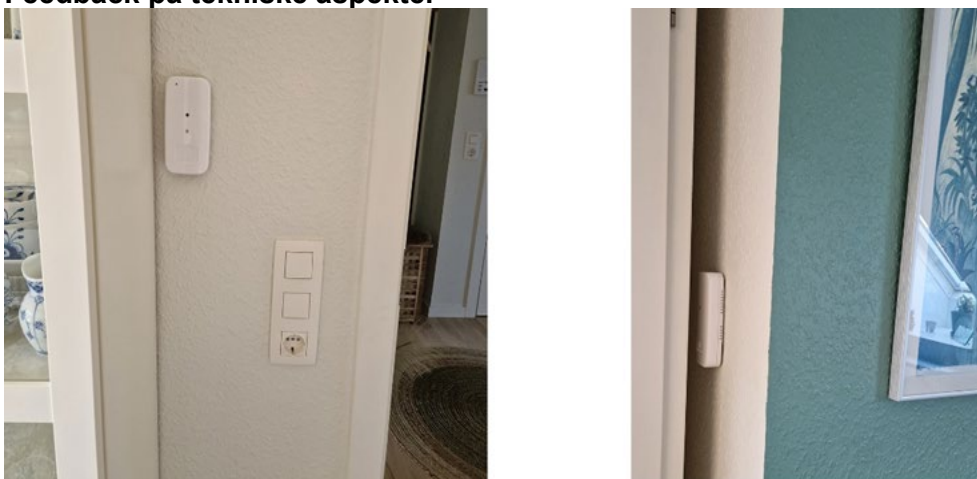
Figur 17. Mulighed for justering af luftindtagetets størrelse i styrespjæld, ved at medfølgende dæksel kan klikkes på forskellige niveauer rangeret fra 1 til 9. Fotocollage: Turid Borgestrand Øien.

En af håndværkerne i huset viste beboeren hvordan reguleringen af luftindtaget fungerede, hvorefter hun selv justerede luftindtaget i lejligheden, og har senere hjulpet sine naboer med det samme: "Det var så der, jeg tænkte, at vi ikke rigtigt var blevet informeret ... Nogle har endda været ude og købe ting for at proppe ned i den kasse der, mens andre ikke har vidst, at den kunne åbnes." Først efter det første driftsår, i maj 2022, fik beboerne egentlig information om udeluftventilerne. Her fik de at vide, at ventilerne helst skulle stå åbent: "Nu siger de godt nok, at den skal være helt åben hele tiden, også om vinteren, for at den skal virke, så skal vi jo ikke derned og rode, men om vi oplever, at vi rent ud fryser igen, skal vi jo det. Der er ikke andet at gøre."

Med den manglende information har beboernes kendskab til systemet i høj grad handlet om, hvad de selv kunne observere. Først var de i tvivl om, hvorvidt udsugningen overhovedet fungerede: "Vi mærker den ikke, vi hører den ikke, aner ikke, om den kører eller ej ... I starten var det også helt dugget [på spejlet], når vi havde været i bad. Der gav vi besked, og ventilationsmanden kom op og stillede på det, og nu er der ikke nogen dug." Ud over det duggede spejl havde de med tiden også observeret, at bruseforhænget bevægede sig, når de åbnede og lukkede døren til badeværelset, og de kunne føle luften på bare ankler, hvis de stod tæt på den lukkede dør. Modsat emhætten kunne man ikke høre udsugningen i badeværelset.

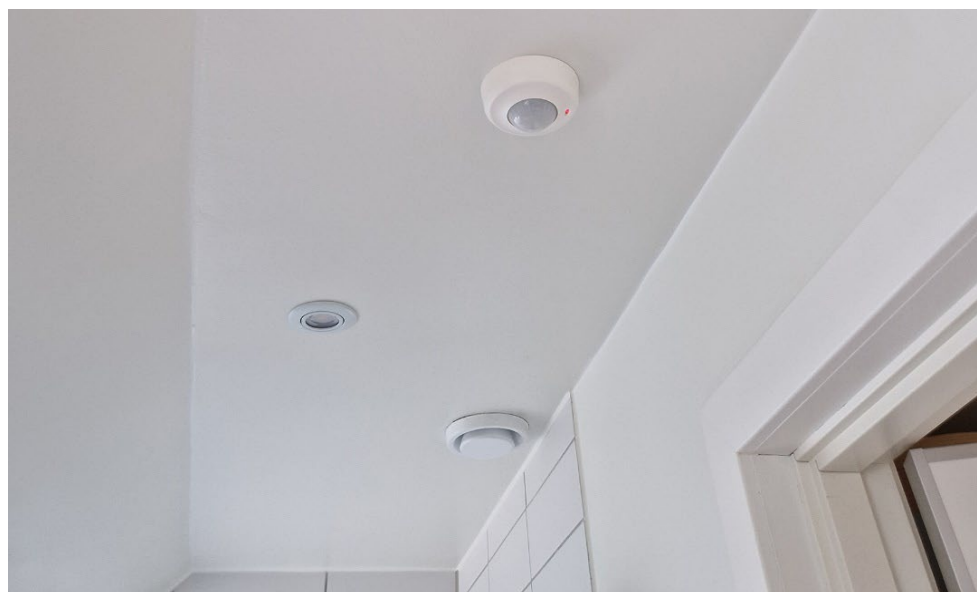
Beboerne var endvidere i tvivl om, hvordan måleteknologien fungerede. De gættede på, at det var bevægelsessensoren, der spillede ind, fordi de kunne se, at dens blinken ændrede sig i tempi og farve, men: "Vi har aldrig nogensinde kunnet mærke, at den skifter modus. I begyndelsen troede vi slet ikke, at den virkede." Beboerne havde heller ikke fået tilgang til måledata eller muligheder for at følge forbrugstal eller på anden måde trække på de aktuelle målinger: "Når man flytter tilbage, burde man enten få en lille folder, der fortæller 'at sådan og sådan', måske med en lille tegning, der viser, at man åbner her, 'den skal helst stå sådan hele året – hvis det kan lade sig gøre, og ellers er det også i orden.'" Beboerne anbefaler, at der som minimum er en folder, der beskriver det specifikke ventilationsanlæg, principper for brug, og hvad de skal holde øje med. Det gælder både nye og eksisterende beboere.

Feedback på tekniske aspekter



Figur 18. Til venstre vises indeklimamåler til styring af ventilationen monteret på stuevæggen, og til højre indeklimamåler til referencemåling monteret i soveværelset. Fotos: Turid Borgestrand Øien.

Figur 18 viser indeklimamåleren, der var monteret på væggen i den centralt beliggende stue. Herudover var der monteret en ekstra indeklimamåler i soveværelset. Denne var ikke en del af den overordnede ventilationsstyring, men har fungeret som referencemåling for luftkvaliteten specifikt i dette rum. Placeringen af indeklimamålere skabte nogen hovedbrud i forhold til indretning og placering af klædeskab og reoler.



Figur 19. Placering af PIR-sensor i badeværelset. Foto: Turid Borgestrand Øien.

Som vist i figur 19 var badeværelset udstyret med en PIR-bevægelsessensor installeret i loftet. Denne sensor aktiverer udsugningen, når der er mennesker i rummet, hvilket sker, ved at PIR-sensorens infrarøde lys registrerer udsving i temperatur, der opstår ved ophold og bevægelse i rummet.

For at den behovsstyrede ventilation skal fungere optimalt, skal luften kunne bevæge sig mellem stue, værelser og køkken til badeværelset, hvor udsugningen er installeret. Den bolig, vi har besøgt, er en tilgængelighedsbolig uden dørtrin, og luften kan passere under døren ind til badeværelset. I de øvrige boliger er der ventilationshuller i dørene. I den aktuelle bolig er børnene flyttet hjemmefra, og der er god luftcirkulation, fordi dørene som regel står åbent mellem de enkelte værelser.



Figur 20. I tilgængelighedsboliger sikrer en luftspalte under døren, at luften bliver udskiftet i alle rum. Foto: Turid Borgestrand Øien.

I forhold til filterskifte har beboerne selv fået lov til at skifte filtre. Begge beboerne arbejder, og det har været besværligt med mange hjemmearbejdsdage i forbindelse med renoveringen. Armaturet sidder meget hårdt fast og de kommenter, at det ikke kan være forventeligt, at alle selv skal kunne håndtere friskluftarmaturet. Især på grund af den lave placering: "Det er ikke skidesmart ... Ældre mennesker får da ikke det der ud ... Når de skal helt derned og kravle rundt."

Boligkvalitet og ventilationsløsningens samvirke med hverdagspraksis

Ved besøget, en varm augusteftermiddag, havde tagvinduerne stået åbent, mens parret var på arbejde, og muligheden for at kunne lufte ud var afgørende for at holde temperaturen nede om sommeren. Endvidere havde familien rutiner for at åbne vinduer og lufte ud i forskellige sammenhænge som efter bad, eller når de havde haft gæster på besøg: "Vi åbner, når vi har været i bad, for at få frisk luft ind og få dampet af, og alt det der ... Om vinteren åbner vi også et kvarter, når vi ordner os eller har haft gæster eller stearinlys."



Figur 21. Beliggenheden på den øverste etage, tillod beboerne at holde vinduer og altandør åbne hele dagen, og på den måde undgå overophedning i sommerperioden. Foto: Turid Borgestrand Øien.

Beboerne var glade for, at de havde kunnet bibeholde deres rutiner med at åbne vinduerne, og at de var kommet uden om den støj, som de havde hørt, at beboerne med balanceret ventilation havde været generet af.

Endvidere blev planløsning og æstetik trukket frem som vigtige kvaliteter ved de ældre boliger, hvilket havde stor betydning for, at beboerne flyttede tilbage efter renoveringen: "Vi stiger ret meget i husleje, og vi skulle vurdere, om vi skulle blive eller finde noget andet ... Så var vi ude og kigge i det nybyggede på markedet. Men det er lange, smalle rum, der er svære at indrette ... Småbitte værelser eller et åbent køkken med stue ... Vi har aldrig været så glade for vores bolig, som efter vi så, hvad man ellers kunne få. Det er, som om de boligformer, man byggede dengang, var noget andet, med gode, store rum." Luftigheden og indretningsmulighederne i de store rum bliver dog udfordret i renoveringsprojekterne, og beboerne fortæller, at mange af beboerne i boligerne med balanceret ventilation har haft problemer med at få deres møbler tilbage i lejligheden efter renoveringen: De nedsænkede lofter til kanalføring gør det svært at få større møbler som senge og sofaer ind i lejligheden. I den pågældende lejlighed har de dog også sænket loftet i gangen. Det skyldes ikke ventilationssystemet, men belysningen, da der er installeret spots.

Erfaringer fra boligorganisationen

Franz Leitner har fulgt renoveringsprojektet siden mobilisering i 2013. Helhedsplanen blev stemt igennem i 2016, og projektet var oprindeligt initieret som en renovering med balanceret decentral ventilation. På baggrund af dialog mellem Landsbyggefonden og boligforeningen kom demonstrationsprojektet omkring behovsstyret ventilation ind som en del af det overordnede renoveringsprojekt. Landsbyggefonden manglede datagrundlag og hands on-erfaringer for en alternativ ventilationsløsning, der egnede sig bedre i renoveringer af muret etagebyggeri. FAB var interesseret i at afprøve en løsning for at imødekomme og på sigt forebygge utilfredse beboere. To identiske blokke blev valgt ud som case.

Franz Leitner påpeger, at det væsentlige i denne løsning har været de ting, beboere og boligorganisation kan vinde på boligkvalitet – især på indretning, da det giver meget mindre anlæg og mere komfort – parametre, hvor den balancerede ventilationsløsning samtidig har

vist sig at være udfordret. I de øvrige boliger i Højstrupparken har der fx været over 50 klager vedrørende de balancerede mekaniske ventilationsanlæg omkring støj, træk og tør luft.

Det, at demonstrationsprojektet blev etableret som en del af den større, igangværende renoveringssag, har betydet, at der ikke har været en egen implementeringsproces med information og beboerinddragelse omkring den behovsstyrede ventilation. Ved demonstrationsprojektet har der modsat været en bevidst tilbageholdelse af information om ventilationsprincipper og design: "Vi har bevidst ikke oplyst beboerne om ventilationen ... Så vi fik dem uden en forudindtaget holdning til det som: 'Nu bør jeg i noget anderledes, så nu skal jeg være specielt opmærksom.' Vi har sagt: 'Du har en bolig, der opfylder de krav, der er til ventilation; det er bare en lidt anden løsning'". Han forklarer videre, at man på denne måde har undgået, at beboerne oplever, at ventilationsløsningen var forceret.

Desuden har forskningsindsatsen omkring Be Ready-projektet og dets empiriske dataindsamling givet anledning til overvejelser omkring bias ved det behovsstyrede anlæg.

Efter et års drift og på baggrund af beboernes indberetninger om trækgener blev der i foråret 2022 udsendt et spørgeskema i de to blokke. Disse var til eget brug i afdelingen og resulterede i blot to svar fra blokken med den balancerede ventilation og 10 svar fra blokken med den behovsstyrede ventilation. Spørgsmålene omfattede indeklima og luftkvalitet generelt, temperatur, fugt samt støj, tekniske problemer og lugtgener fra ventilationssystem eller emhætte. Herudover blev beboerne spurgt til, om de var klar over, at de deltog i et demonstrationsprojekt, samt om de kendte de to ventilationsprincipper.

Franz Leitner peger på paradokset i udviklings- og demonstrationsprojekter, at nytænkning kan være op imod en konservatisme i byggebranchen, både fra rådgivere, entreprenører og bygherrer. Det viste sig at være svært at trække erfaringerne fra demonstrationsprojektet over i det overordnede renoveringsprojekt. Selvom der var option på at køre behovsstyret ventilation i afsnit 2, og ingeniøren var ved at være overbevist efter at have set resultaterne fra demonstrationsprojektet, stoppede det ved entreprenøren, som allerede havde forhandlet de oprindelige leverancer, ydelser og byggelogistik og var svær at rykke, især grundet den korte responstid, da projektet allerede var i gang. Entreprenøren var ikke interesseret i at miste sine ydelser, hvorfor valg af ventilationsløsning bør være med fra start, og om valget står på det behovsstyrede system, bør det udbydes som en option i udbuddet.

Sammenfattende kan interviewene opsummeres sådan:

- Beboerne har oplevet, at de manglede information, og der var usikkerhed om, hvorvidt ventilationen fungerede, som den skulle.
- Beboerne oplevede træk.
- Der var betydelig værdi i forhold til den meget stille løsning, der fungerede i samspil med beboernes udluftningsbehov ved vinduer og døre.
- Desuden var det et stort plus, at der ikke gik brugbart boligareal til kanalføringer.

6 SALLINGHUS – BEREGNINGER AF FORBRUG

Dette kapitel gennemgår beregninger for energi- og økonomiforbrug for behovsstyret udsugningsventilation. Den aktuelle renovering af Sallinghus er udgangspunktet for beregning af CO₂, energi og økonomi, herunder anlægs- og driftsøkonomi.

Teoretisk gennemregning af omkostninger og forbrug af primærenergi for igangværende projekter

Denne gennemgang er lavet for at finde den mest fordelagtige anlægsopbygning ud fra hensynet til både beboeren, bygningsstrukturen samt ikke mindst de energimæssige fordele ved forskellige styringsmetoder. Det er hensigten at sikre, at unødvendigt højt luftskifte med følgende højt energiforbrug undgås, samt at for lavt luftskifte med dårlig luftkvalitet og risiko for fugtrelaterede problemer såsom fremvækst af skimmelsvampe og husstøvmider undgås.

Mulighederne for energioptimering ved brug af behovstilpasset udsugningsventilation undersøges med udgangspunkt i den konkrete renoveringssag for boligejendommen Sallinghus (SAB/KAB) i Vanløse (Storkøbenhavn). Dette gøres med henblik på at analysere det primære energiforbrug og økonomi i forbindelse med investering og drift ved forskellige anlægsformer. Der sammenlignes primært med et balanceret ventilationsanlæg med indbygget varmegenvinding. Det balancerede ventilationsanlæg anslås at have en effektiv (realistisk) varmegenvinding på 70 % (EUDP Sekretariatet 2014), hvilket derfor tages i betragtning i forbindelse med nedenstående teoretiske gennemgang.

Foreløbige resultater på energiforbrug

Det teoretiske grundlag viser, at behovsstyret udsugningsventilation forventes at være et konkurrencedygtigt alternativ til et balanceret ventilationsanlæg med varmegenvinding.

Der ses et højere varmeforbrug ved behovsstyret udsugningventilation på grund af den manglende varmegenvinding, men et lavere elforbrug på grund af den tilpassede drift af anlægget ud fra indeklimamonitoreringen i den enkelte bolig og fraværet af ventilator for tilførsel af udeluft.

Samlet set viser det sig, at når forskellen i energiniveauerne udregnes ud fra en økonomisk betragtning (energipriser fra juni 2022), ligger de meget tæt på hinanden med en mindre fordel til det behovsstyrede udsugningsanlæg på grund af det lavere elforbrug.

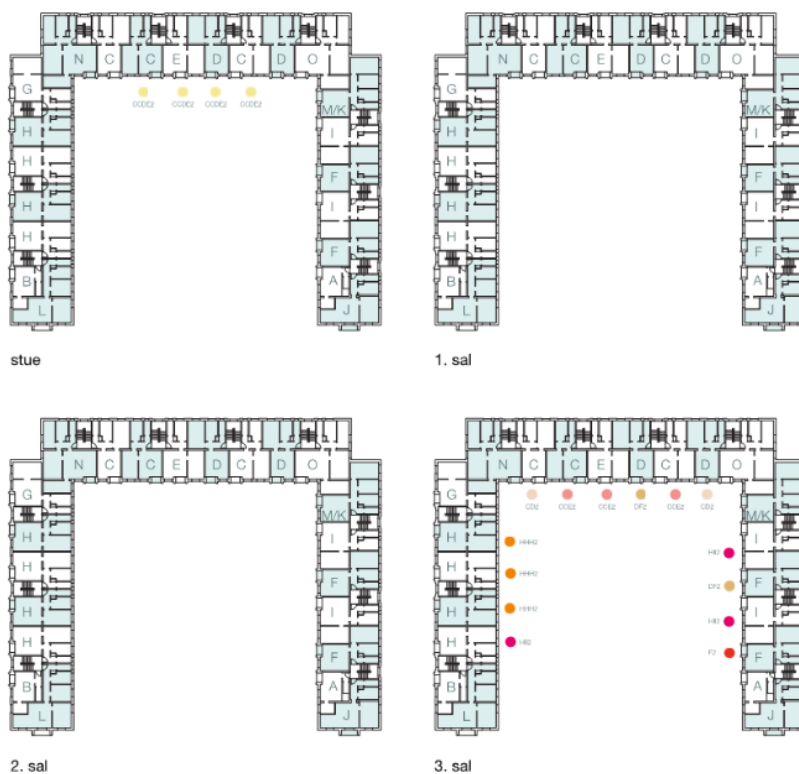
Hvis de beregnede energibehov i Sallinghus derimod vægtes i henhold til BR18's værdier for el (1,9) og fjernvarme (0,85), er der et teoretisk merforbrug af primærenergi ved behovsstyret udsugningsventilation på ca. 11 %.

Derfor undersøges muligheden for at genvinde dele af varmen fra afkastluften via luft til vand-varmepumpe med henblik på at indhente ovenstående forskel i energiforbruget.

Til ovenstående sammenligning af energiforbrug i forskellige anlægstyper viser målinger i Højstrupparken i Odense, som er etableret med decentrale anlæg og har været i drift siden efteråret 2021, at det primære energiforbrug i de behovsstyrede udsugningsanlæg ligger ca. 4-9 % over forbruget i de decentrale anlæg for balanceret ventilation.

Grundlag for Sallinghus samt anlægsopbygning for ventilering af ejendommen

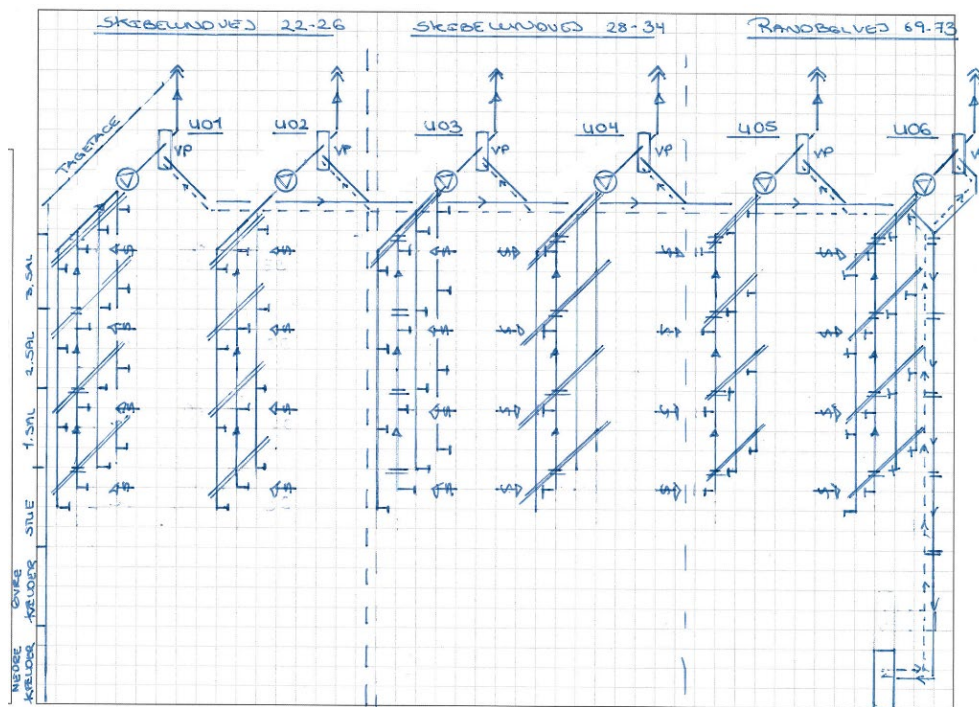
Sallinghus er opført i 1944-1945 af Dominia og består af tre blokke formet som en hestesko. Det er en bebyggelse på fire etager med beboelse og fuld kælder. Boligarealet bliver fremadrettet udvidet med delvis udnyttelse af tagetagen i forbindelse med ændring af 3. salslejlighederne til tagboliger med indvendig trappe. Bebyggelsen indeholder i alt 88 lejligheder fordelt på 1-, 2-, 3- og 4-værelseslejligheder, hvoraf 4-værelseslejlighederne bliver taglejligheder med indvendig trappe fra 3. salen. Etageplaner er vist i figur 22.



Figur 22. Lejlighedsplaner for de fire beboede etager i Sallinghus. Den kommende beboede tagetage er ikke vist. Tegninger: NOVA 5.

Samlet har Sallinghus 6.003,8 m² opvarmet etageareal. Bebyggelsen er tilsluttet fjernvarmeforsyning fra HOFOR A/S samt elforsyning fra Ørsted A/S.

Anlægsopbygningen for Sallinghus bliver seks behovsstyrede udsugningsanlæg fordelt med to anlæg for hver blok. I forbindelse med en vurdering af de muligheder, der kan være for at etablere varmegenvinding på behovsstyrede udsugningsanlæg, foretages en beregning af varmegenvinding via luft til vand-varmepumper på henholdsvis ét af udsugningsanlæggene samt alle seks udsugningsanlæg som vist i figur 23. Resultatet af dette fremgår senere i rapporten.

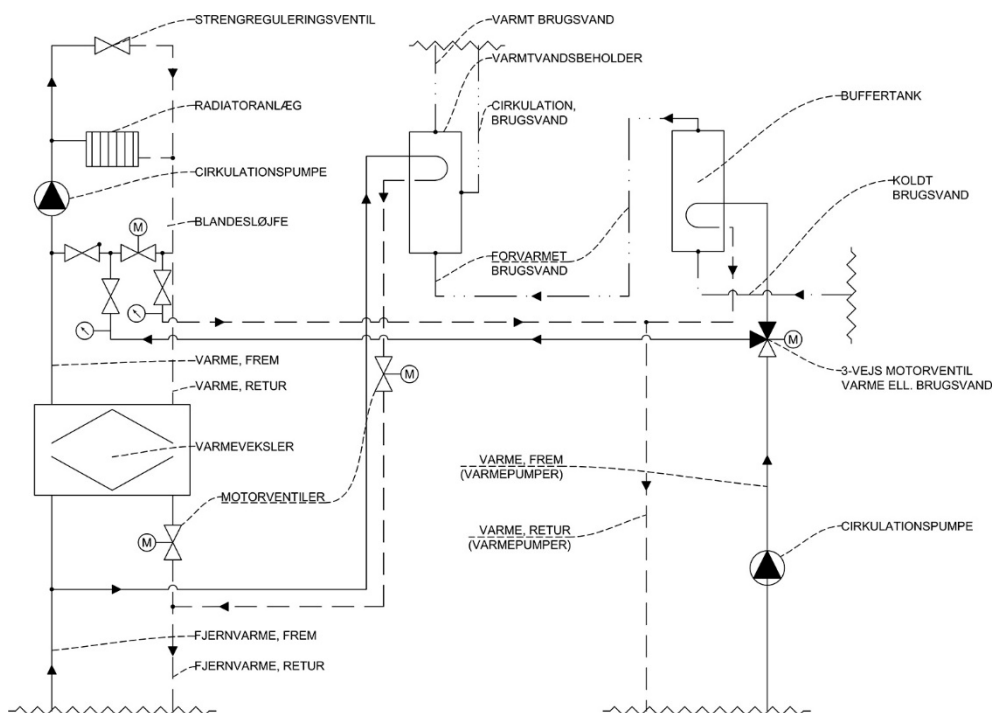


Figur 23. Princip for behovsstyret udsugning med varmegenvinding via luft til vand-varmepumpe. Her vist for alle seks udsugningsanlæg. Tegning: WSP.

Ovenstående princip vil også kunne opbygges med individuelle bufferbeholdere i hvert kælderafsniit for hvert udsugningsanlæg og med tilkobling direkte ind på centralvarmen for dermed at opnå en besparelse på rørføringen retur til varmecentralen. Den opbygning vil dog ikke kunne bidrage til opvarmning af brugsvandet ved varmtvandsbeholderen i varmecentralen, som vil være særligt attraktivt om sommeren da varmecentralen kører på lavere blus, hvorfor dette ikke uddybes nærmere i forbindelse med nærværende redegørelse.

I varmecentralen føres varmerørene frem til en buffertank via indbygget varmespiral til forvarmning af det kolde brugsvand. Brugsvandet, som er forvarmet, løber videre frem til varmtvandsbeholderen, hvor det eftervarmes op til 55 °C efter behov. Den resterende overskudsvarme fra varmepumpen ledes til centralvarmeanlægget, hvor den indgår i den almindelige cirkulation af det varme vand til radiatoranlægget, som med nye store radiators udlægges til temperatursættet 60/30 °C. Alternativ anlægsopbygning kan ske med solvarmespiral direkte i varmtvandsbeholderen.

Er der ikke et opvarmningsbehov for hverken brugsvand eller centralvarme, stopper varmepumperne, og der genvindes ikke på afkastluften.



Figur 24. Hovedprincip for tilslutning af rørinstallation for varmepumpe i forbindelse med behovsstyret udsugning. Øvrig varmecentral i henhold til eksisterende/nye forhold. Tegning: WSP.

Grundlag for beregning af luftmængder, driftsscenerier og energiforbrug

Beregning af energiforbruget sker på baggrund af anlæggenes elforbrug sammenholdt med deres driftstimer over døgnet. På grund af forskellen mellem de to anlægsformer regnes der med forskellige driftstimer for minimumsdrift, almindelig daglig drift og forceret drift. Derudover regnes der med, at regulering af spjæld i emfanget indgår i driften af det balancerede ventilationsanlæg, hvorimod det ved behovsstyret udsugning indgår som et ekstra energiforbrug i forbindelse med emhættedrift, som kører separat i forhold til det behovsstyrede udsugningssystem.

Der kan argumenteres for, at når emhætten er i drift og suger luften direkte ud, vil indeklimaet i boligen tilsvarende forbedres med afledt reducere af behovet for grundudsugning. Det vurderes dog, at emhættens energiforbrug vil være langt større end den besparelse, der opnås på den centrale boksventilator i tagrummet, når enkelte beboere bruger emhætten, og boksventilatoren i så fald reducerer luftstrømmen en smule. Man har derfor valgt at se bort fra denne mindre besparelse i elforbrug i det behovsstyrede udsugningsanlæg.

Først findes de beregningsmæssige luftmængder på baggrund af gældende lovgivning samt almindelig praksis.

Der regnes med nedenstående retningslinjer for henholdsvis balanceret ventilation og behovsstyret udsugning (data gengives skematisk under Driftsscenerier på side 51).

Balanceret ventilation

De gældende luftmængder for balanceret ventilation er udlagt i henhold til BR18, kapitel 22, og opdelt som følger:

Grundventilering (basisventilering):

- 0,3 l/s pr. m² (svarende til godt 20 l/s for en gennemsnitslejlighed)

Forceret drift:

- 15 l/s for badeværelse samt 20 l/s for køkken, dvs. i alt 35 l/s (svarende til 0,5 l/s pr. m² for en gennemsnitslejlighed).

Behovsstyret udsugning

Luftmængder for behovsstyret udsugning er opdelt i henholdsvis grundventilering, øget ventilering (hvile), øget ventilering (aktivitet) og forceret ventilering som følger:

Grundventilering:

- anvendes, når der ikke er personer til stede, til en nedre grænse på ~6 l/s (22 m³/h) i henhold til rapporten "Resultater og erfaringer fra energirenovering af Ryesgade 30" (EUDP Sekretariatet 2014).

Øget ventilering:

- hvile: anvendes i forbindelse med nattesøvn og regnes til 15 l/s
- aktivitet: anvendes i forbindelse med almindelig daglig tilstedeværelse og regnes til 25 l/s.

Ovenstående luftmængder svarer med et gennemsnit på 20 l/s og den gennemsnitlige lejlighedsstørrelse for Sallinghus på 68,2 m² (6003,8 m²/88 lejligheder) til ca. 0,3 l/s pr. m². Dog er driftstiden for de to ventilationsformer ikke en ligelig fordeling, og den gennemsnitlige luftmængde vil derfor afvige fra de ca. 0,3 l/s pr. m².

Forceret ventilering:

- anvendes i forbindelse med høj tilstedeværelse i et interval på mellem 25 og 55 l/s og regnes her til et vægtet gennemsnit på 35 l/s (større sandsynlighed for lavere drift gående mod mindre sandsynlighed for maksimal drift).

Driftsscenerier

Herunder er opstillet det grundlag, som begge anlægsformer bygger på. Derudover er det i forbindelse med behovsstyret udsugning forudsat, at der i perioder, hvor beboerne ikke er hjemme, forventes at være et minimum af ventilationsbehov, hvorimod der morgen og aften vil være et øget ventilationsbehov.

Øget ventilering er opdelt i de to scenarier i forbindelse med henholdsvis nattesøvn (hvile) og vågen tilstand (aktivitet) som en variation af de forskellige situationer. Derudover vil der være en mindre periode med forceret ventilering i forbindelse med almindeligt ophold i hjemmet samt i forhold til anvendelse af badeværelset samt ved samling omkring tilberedning af aftensmad og selskaber.

På grund af det ekstra behov i disse situationer opbygges behovsstyret udsugning med mulighed for at kunne forcere udsugningskapaciteten over de generelle krav i henhold til BR18 for netop at sikre muligheden for hurtigt at opnå en bedre luftkvalitet i disse perioder. Der antages et grundlæggende driftsscenario ud fra tre varierende belastninger for henholdsvis balanceret ventilation (tabel 12) og behovsstyret udsugning (tabel 13) herunder.

TABEL 12. Driftssituationer forudsat ved balanceret ventilation.

System	Grundventilering	Øget ventilering, hvile	Øget ventilering, aktivitet	Forceret ventilering
Balanceret ventilation	Min. 0,30 l/s pr. m ² eller min. 15 l/s for badeværelse	Ej relevant	Ej relevant	Badeværelse = 15 l/s, emfang (køkken) = 20 l/s

TABEL 13. Driftssituationer forudsat ved behovsstyret udsugning.

System	Grundventilering	Øget ventilering, hvile	Øget ventilering, aktivitet	Forceret ventilering
Behovsstyret udsugning	6 l/s	15 l/s (gennemsnitlig betragtning af interval på 6-25 l/s)	25 l/s (gennemsnitlig betragtning af interval på 15-35 l/s)	Badeværelse = 15 l/s, køkken = 20 l/s, emfang = 20 l/s (ekstern) (regnes som et interval på 25-55 l/s)

Samlede luftstrømme

Balanceret ventilation:

Systemet for balanceret ventilation opbygges med fire balancerede ventilationsanlæg med krydsveksler for betjening af henholdsvis 20 og 24 lejligheder. Der tages udgangspunkt i luftmængderne vist i tabel 14.

TABEL 14. Luftmængder for anlæggene ved balanceret ventilation.

System	Grundventilering	Øget ventilering	Forceret ventilering* ¹
VE01	2.534 m ³ /h	Ej relevant	3.830 m ³ /h
VE01	1.940 m ³ /h	Ej relevant	3.020 m ³ /h
VE01	2.434 m ³ /h	Ej relevant	3.730 m ³ /h
VE01	2.040 m ³ /h	Ej relevant	3.120 m ³ /h

*¹ Forudsat en samtidighedsfaktor på 75 %.

Der regnes generelt med et gennemsnit af ovenstående og en samtidighed på 75 % i forbindelse med den forcerede ventilation. Dermed fås luftstrømme vist i tabel 15 til beregning af energiforbrug.

TABEL 15. Gennemsnitlige luftstrømme ved balanceret ventilation med reduktion af luftstrømmen ved forceret ventilation baseret på en samtidighedsfaktor på 75 %.

System	Grundventilering	Øget ventilering	Forceret ventilering
Balanceret ventilation	2.237 m ³ /h	Ej relevant	3.425 m ³ /h

Behovsstyret udsugning

Systemet for behovsstyret udsugning opbygges med to anlæg, der betjener 12 lejligheder, og fire anlæg, der betjener 16 lejligheder, fordelt med to anlæg pr. boligblok.

Med baggrund i tabel 13 opnås der for behovsstyret udsugning luftstrømme vist i tabel 16 i de seks anlæg.

TABEL 16. Luftstrømme ved behovsstyret udsugning.

System	Grundventilering	Øget ventilering, hvile	Øget ventilering, aktivitet	Forceret ventilering* ²
U01 (16 lejligheder)	351 m ³ /h	864 m ³ /h	1.440 m ³ /h	1.545 m ³ /h
U02 (12 lejligheder)	264 m ³ /h	648 m ³ /h	1.080 m ³ /h	1.267 m ³ /h
U03 (16 lejligheder)	351 m ³ /h	864 m ³ /h	1.440 m ³ /h	1.662 m ³ /h
U04 (16 lejligheder)	351 m ³ /h	864 m ³ /h	1.440 m ³ /h	1.662 m ³ /h
U05 (12 lejligheder)	264 m ³ /h	648 m ³ /h	1.080 m ³ /h	1.167 m ³ /h
U06 (16 lejligheder)	351 m ³ /h	864 m ³ /h	1.440 m ³ /h	1.645 m ³ /h

*² Forudsat en samtidighedsfaktor på 75 %.

På linje med beregningerne for balanceret ventilation regnes der generelt med et gennemsnit af ovenstående og en samtidighed på 75 % i forbindelse med den forcerede ventilation. Dermed fås luftstrømme som vist i tabel 17 til beregning af energiforbrug.

Der regnes generelt med et gennemsnit af ovenstående luftmængder i forbindelse med beregning af effektforbruget.

TABEL 17. Gennemsnitlige luftstrømme ved behovsstyret udsugning med reduktion af luftstrøm, men ved forceret ventilation baseret på en samtidighedsfaktor på 75 %.

System	Grundventilering	Øget ventilering, hvile	Øget ventilering, aktivitet	Forceret ventilering* ²
Behovsstyret udsugning	322 m ³ /h	792 m ³ /h	1.320 m ³ /h	1.491 m ³ /h

Driftstimer:

De enkelte driftsscenerier forventes at finde anvendelse i henhold til nedenstående tabeller, tabel 18 og 19, for henholdsvis hverdage og weekender samt summeret for et år i tabel 20.

TABEL 18. Driftstider på hverdage.

System	Grundventilering	Øget ventilering, hvile	Øget ventilering, aktivitet	Forceret ventilering* ³
Balanceret ventilation	22,8 timer/døgn	Ej relevant	Ej relevant	1,2 timer/døgn
Behovsstyret udsugning	10 timer/døgn	8 timer/døgn	4,8 timer/døgn	1,2 timer/døgn

*³ Jf. SBI-anvisning 213.

TABEL 19. Driftstider i weekender.

System	Grundventilering	Øget ventilering, hvile	Øget ventilering, aktivitet	Forceret ventilering* ²
Balanceret ventilation	22,8 timer/døgn	Ej relevant	Ej relevant	1,2 timer/døgn
Behovsstyret udsugning	4,8 timer/døgn* ⁴	8 timer/døgn	10 timer/døgn	1,2 timer/døgn

*⁴ Inkl. estimering af ferier og weekender væk fra hjemmet.

TABEL 20. Driftstider opsummeret til et helt år.

System	Grundventilering	Øget ventilering, hvile	Øget ventilering, aktivitet	Forceret ventilering*2
Balanceret ventilation	8.212,5 timer/år	Ej relevant	Ej relevant	547,5 timer/år
Behovsstyret udsugning	3.078 timer/år	2.920 timer/år	2.214,5 timer/år	547,5 timer/år

Forskel i det primære energiforbrug

Der er som udgangspunkt et energiforbrug, der er ca. 11 % større ved behovsstyret udsugning. Dette energiforbrug søges erstattet ved varmegenvinding via luft til vand-varmepumpe på det ene behovsstyrede udsugningsanlæg.

Da ejendommen har et radiatoranlæg med temperatursæt på 60/30 °C, vil varmepumpen ikke give det maksimale udbytte på grund af temperaturniveauet, hvis den alene bidrager til varmeanlægget. Det vil derfor være relevant også at se på bidrag til opvarmning af brugsvandet for at opnå en bedre udnyttelse af varmegenvindingen og opnå en højere SCOP-faktor (Seasonal Coefficient Of Performance viser, hvor effektiv en varmepumpe er til at levere varme set over et helt år).

Idet Sallinghus består af seks behovsstyrede udsugningsanlæg, og der som udgangspunkt kun skal hentes de manglende ca. 11 % i det vægtede energiforbrug, vælges det at eftervise betydningen af etablering af varmegenvinding via varmepumpe på kun det ene anlæg. Anlægsformen vil dog være skalerbar til de fem øvrige behovsstyrede udsugningsanlæg. Dette vises sidst i nedenstående afsnit.

Til sammenligning med øvrige sammenlignelige anlægsformer er det med baggrund i ovenstående valgt at vise omkostninger og energiforbrug for de tre anlægsformer med reference til et simpelt udsugningsanlæg. Dette med henblik på at anskueliggøre det primære energiforbrug samt økonomiske betragtninger, herunder marginaløkonomi for varmegenvindingen, og anskueliggøre dens tilbagebetalingstid.

De tre anlægsformer samt referencen udgør følgende typer:

- konstant udsugningsanlæg (referencen) – tidligere anvendt anlægsform for ventilering af etageboliger, der ikke længere er lovlig at etablere efter nuværende reglement på grund af manglende varmegenvinding og tilførsel af forvarmet erstatningsluft
- balanceret ventilation med varmegenvinding (regnet som fire centralanlæg for Sallinghus)
- behovsstyret udsugning uden varmegenvinding (regnet som seks behovsstyrede udsugningsanlæg)
- behovsstyret udsugning med varmegenvinding via varmepumpe (fem behovsstyrede udsugningsanlæg + et kombineret udsugnings- og varmepumpeanlæg).

Den teoretiske eftervisning har givet nedenstående resultat (alle resultater er afrundet).

TABEL 21. Årligt energiforbrug (el og varme) udtrykt i absolutte tal og som et forbrug i forhold til referencen med simpel udsugningsventilation.

	Udsugning ekskl. VGV (reference)	Centralanlæg inkl. VGV via veksler	Behovsstyret udsugning ekskl. VGV	Behovsstyret udsugning inkl. VGV via luft til vand-VP x 1 v. VF på 60 °C
Forskel i elforbrug (kWh)	100 % 6,608	420 % 27,767	52 % 3,454	131 % 8,637
Forskel i varmeforbrug (kWh)	100 % 325,565	30 % 97,669	52 % 169,780	36 % 116,108

Herunder vises det økonomiske overslag opdelt i henholdsvis etableringsomkostninger samt årlig drift og finansiering. Derefter vises tilbagebetalingstiden for etablering af varmegenvinding for hver anlægsform. Opbygning af ventilationsanlæg samt afledte indgreb for murer og tømrer samt VVS og el er medtaget i priserne for fuld etablering af ventilationssystemerne.

De økonomiske data for behovsstyret udsugning er opdateret ud fra den vindende hovedentreprenørs og dennes underentreprenørers tilbudspriser efter afholdt licitation på Sallinghus. Relevante anlægsdele for balanceret ventilation såvel som for referencen er ligeledes blevet opdateret, hvor det har været muligt/relevant på baggrund af komponent- eller kanalpriser i tilbuddet. Dette er ligeledes gældende for afledte arbejder for murer, tømrer, VVS og el. Øvrige priser er overslagspriser indhentet fra leverandører mv. Tabel 22 viser resultatet af beregningen af etableringsomkostninger for de forskellige anlægstyper. Tabel 23 viser tilsvarende resultatet af beregningen af driftsomkostninger tillagt afskrivning af investeringen. Endelig viser tabel 24 marginaløkonomien for etablering af varmegenvinding som den simple afskrivningstid for investeringen.

TABEL 22. Etableringsomkostninger udtrykt i absolutte tal og som omkostninger i forhold til referencen.

	Udsugning ekskl. VGV (reference)	Centralanlæg inkl. VGV via veksler	Behovsstyret udsugning ekskl. VGV	Behovsstyret udsugning inkl. VGV via luft til vand-VP v. VF på 60 °C (1 anlæg)
Anlægsudgifter	100 % 3.243.100 kr.	185 % 5.995.300 kr.	176 % 5.695.100 kr.	180 % 5.835.300 kr.

TABEL 23. Årlige udgifter (drift og finansiering) udtrykt i absolutte tal og som omkostninger i forhold til referencen.

Sammenligning af anlægstyper	Udsugning ekskl. VGV (reference)	Centralanlæg inkl. VGV via veksler	Behovsstyret udsugning ekskl. VGV	Behovsstyret udsugning inkl. VGV via luft til vand-VP x 1 v. VF på 60 °C
Ydelse på finansiering v. 3,6 % af anlægsudgiften	100 % 116.753 kr.	185 % 215.832 kr.	176 % 205.023 kr.	180 % 210.071 kr.
Service og afskrivning v. 4,5 % af anlægsudgiften	100 % 145.941 kr.	185 % 269.791 kr.	176 % 256.279 kr.	180 % 262.588 kr.
Forbrug el (252 øre/kWh)*	100 % 16.652 kr.	420 % 69.974 kr.	52 % 8.703 kr.	131 % 21.756 kr.
Forbrug varme (49 øre/kWh)*	100 % 159.527 kr.	30 % 47.858 kr.	52 % 83.192 kr.	36 % 56.893 kr.
Samlet årlig udgift (drift og finansiering)	100 % 438.873 kr.	138 % 603.455 kr.	126 % 553.197 kr.	126 % 551.317 kr.

*5 Opgivet af HOFOR henholdsvis Ørsted pr. 05.06.2022.

TABEL 24. Afskrivningstiden for merudgifterne til etablering af varmegenvinding.

	Udsugning ekskl. VGV (reference)	Centralanlæg inkl. VGV via veksler	Behovsstyret udsugning ekskl. VGV	Behovsstyret udsugning inkl. VGV via luft til vand-VP x 1 v. VF på 60 °C
Tilbagebetalingstid	-	47 år	29 år	27 år

Ovenstående viser, at etablering af behovsstyret udsugningsanlæg som udgangspunkt bør have en fordel over for de almindelige etablerede anlægsformer, og at det allerede gælder med en begrænset varmegenvinding kun fra dele af det samlede udsugningssystem.

Det primære energiforbrug vil ved behovsstyret udsugning med varmegenvinding på det ene af de seks mulige anlæg give en positiv forskel på ca. 15 % reduceret energiforbrug i forhold til balanceret ventilation grundet varmegenvindingen samt det lavere elforbrug.

Ved opfyldelse af bygningsreglementets krav til varmegenvinding, der udtrykker, at løsningen højst må have et primært energiforbrug, som svarer til forbruget i et balanceret ventilationsanlæg med varmegenvinding, vil der skulle etableres behovsstyret udsugning med varmegenvinding på mindst ét af de seks udsugningsanlæg i henhold til denne eftervisning.

Der gøres opmærksom på, at da ovenstående teoretiske beregninger er foretaget på baggrund af en aktuel sag, vil resultatet for andre ejendomme sandsynligt fravige ovenstående resultater i mindre eller større grad.

Selvom ovenstående resultater med varmegenvinding på ét behovsstyret udsugningsanlæg i sig selv falder positivt ud, vil det være oplagt at se på resultatet af et fuldt udbygget system for alle seks anlæg.

Beregning for seks anlæg med varmepumpe for varmegenvinding

En eftervisning for etablering af varmegenvinding for alle seks behovsstyrede udsugningsanlæg vil resultere i et energiforbrug og en marginaløkonomi som vist i tabel 25 til sammenligning med de øvrige driftsformer som gennemgået ovenfor.

TABEL 25. Årligt energiforbrug (el og varme) ved varmepumpe udtrykt som et forbrug i forhold til referencen.

	Behovsstyret udsugning inkl. VGV via luft til vand-VP x 6 v. VF på 60 °C
Elforbrug	523 % 34.553 kW
Varmeforbrug	-47 % -152.256 kW
Anlægsudgifter	215 % 6.987.191 kr.
Ydelse på finansiering v. 3,6 % af anlægsudgiften	215 % 251.539 kr.
Service og afskrivning	215 % 314.424 kr.
Forbrug el (252* ⁵ øre/kWh)	523 % 86.800 kr.
Forbrug varme (49* ⁵ øre/kWh)	-47 % 74.605 kr.
Samlet årlig udgift (drift og finansiering)	132 % 578.431 kr.
Tilbagebetalingstid	23 år

Dette betyder, at anlægsopbygningen helt vil kunne dække opvarmningsbehovet af erstatningsluften, samtidig med at den bidrager til opvarmning af brugsvandet samt den øvrige opvarmning af bygningen i forbindelse med almindeligt transmissionstab. Det økonomiske overslag er opdelt i henholdsvis etableringsomkostninger samt årlig drift og finansiering med deraf forskel i marginaløkonomi og tilbagebetalingstid. Ved etablering af varmegenvinding på alle seks behovsstyrede udsugningsanlæg vil elforbruget stige noget mere til sammenligning med behovsstyret udsugningsanlæg uden varmegenvinding eller med en enkel varmepumpe. Idet varmeforbruget ikke blot reduceres, men giver et større

bidrag ved forøget udnyttelse af afkastluften for alle seks anlæg og dermed reduceret fjernvarmeforbrug, opnås der i sidste ende en kortere tilbagebetalingstid af investeringen. Det primære energiforbrug vil ved behovsstyret udsugning med varmegenvinding på alle seks anlæg give en positiv forskel på ca. 147 % reduceret energiforbrug i forhold til balanceret ventilation på grund af den opnåede varmegenvinding af afkastluften.

Det vurderes, at ovenstående tilbagebetalingstid vil kunne reduceres yderligere, hvis fremløbstemperaturen sænkes i forbindelse med forsyning til lavtemperaturanlæg i ejendommen (dette er dog p.t. ikke i planerne for Sallinghus). Der vil derfor sandsynligvis kunne optimeres endnu mere på de forskellige anvendelsesmuligheder ved andre typer af renoveringer og/eller byggerier og ejendomme.

CO₂-belastninger og det indvendige brugbare areal af boligerne efter etablering af skakte

Behovsstyret boligventilation har nogle fordele sammenlignet med balanceret ventilation: Der bruges fx mindre plads til installationsskakte. Balanceret ventilation forudsætter etablering af kanalsystem til distribution af udeluft til alle boligens rum. Det betyder i praksis en reduktion af boligernes areal, ved at der skal skabes plads til kanaler, hvor skabe fjernes, og lofter sænkes. Ved behovsstyret ventilation trækkes frisk luft direkte ind via klimaskærm, fx bag ved radiator eller i vindue. Det betyder reelt, at det brugbare boligareal (nettoarealet) ikke bliver reduceret i samme grad som ved balanceret ventilation. I denne rapport har vi søgt at kvantificere effekten heraf. Det faktiske boligareal vil typisk ikke reduceres i samme omfang mht installationsskakte, når der ikke skal etableres rørkanaler til forvarmet luft, som skal distribueres til alle lejlighedens rum. Typisk vil et sådant kanalsystem ved balanceret ventilation ud over inddragelse af gulvareal også betyde nedsænkede lofter og fjernelse af eksisterende skabe.

En mindre reduktion af nettoboligarealet ved behovsstyret udsugningsventilation i forhold til alternativet med balanceret ventilation er helt central, da byggeri handler om at skabe arealer til beboerne. Beboerne vil se positivt på, at deres bolig ikke bliver mindre. Dette kan kvantificeres både i penge og i CO₂-ækvivalenter. Den samlede pris for at etablere 1 m² er ca. 18.000 kr. (Orbesen 2020; Danmarks Statistik 2024), hvorfor skift til behovsstyret boligventilation giver en sparet investering af størrelsen 18.000 kr./m² x 0,42 m² pr. lejlighed svarende til 7.560 kr. Tommelfingerreglen for CO₂-emissionen fra nybyggeri er jf. tabel 26, at opførelsen tegner sig for 75 % af CO₂-emissionen, mens driften over 50 år kun udgør 25 %. Herunder regnes der med, at arealforbruget til installationsskakte belaster med CO₂-ækvivalenter svarende til både opførelse og drift.

TABEL 26. Gennemsnitlig CO₂-belastning pr. m² fra henholdsvis opførelse og drift for nyere boliger baseret på beregninger for en levetid på 50 år (Zimmermann m.fl. 2020).

Desuden vises kolonne med den samlede CO₂-belastning for en bolig med et areal på 70 m² inklusive en skakt til behovsstyret udsugningsventilation og en kolonne baseret på en bolig med et forøget areal svarende til det ekstra skaktareal på 0,42 m², der kræves ved balanceret ventilation.

	CO ₂ -ækvivalenter kg/m ² /år	Behovsstyret udsugning CO ₂ -ækvivalenter kg/år	Balanceret ventilation CO ₂ -ækvivalenter kg/år
Opførelse	7,1	0	0,42 x 7,1 = 3
Drift	2,3	70 x 2,3 = 161	70,42 x 2,3 = 162
Samlet	9,4	161	165

Arealforbruget til skakte for etablering af balanceret mekanisk ventilation fjerner 0,42 m² mere af det indvendige og tilgængelige boligareal end behovstilpasset udsugningsventilation. Hertil kommer eventuelt andre reduktioner i boligen i form af

nedsænkede lofter mv., der ikke er medtaget her. CO₂-belastningen for balanceret ventilation bliver 2,5 % større end for behovsstyret udsugningsventilation i disse simplificerede beregninger, som inkluderer tabet af nyttigt boligareal ved nye arealkrævende installationer.

Behovsstyret ventilation uden varmegenvinding giver ifølge det gennemførte måleprojekt (FAB Odense) et vægtet forbrug af primærenergi, som er 4-5 % højere det første år og 8-9 % højere de følgende år, mens modelberegninger på den projekterede løsning i Sallinghus tyder på, at det vægtede forbrug af primærenergi i den bebyggelse vil være 11 % større.

7 VARMEGENVINDING

Som det fremgår af analyserne fra Højstrupparken, lever behovsstyret boligventilation *uden* varmegenvinding ikke helt op til bygningsreglementets krav om, at det samlede energiforbrug ikke må være større end ved balanceret ventilation. Her var det vægtede primære energiforbrug i de første driftsår 4-5 % højere end ved *decentral balanceret* ventilation. I de to efterfølgende år er forskellen endnu større, hvor det vægtede forbrug af primærenergier 8-9 % højere.

Dette betyder, at projekter med behovsstyret ventilation kun bør gennemføres, *enten* ved at der etableres varmegenvinding, som kompenserer for dette begrænsede merforbrug, *eller* ved at der indhentes en kommunal dispensation, som giver dispensation for et marginalt større forbrug af primærenergi.

Dette kapitel ser nærmere på de energimæssige, tekniske og økonomiske muligheder for varmegenvinding i forbindelse med behovsstyret boligventilation. Ved behovsstyret ventilation trækker udsugningsanlægget varm og fugtig luft fra køkken og bad, og denne afkastluft rummer et energiindhold med betydeligt potentiale, der kan udnyttes og erstatte tilført energi. For etageboliger vil det typisk være energi fra seks til 10 lejligheder, men grundet de store omkostninger med at etablere rørsystem med forsyning af forvarmet frisk luft i alle lejligheder og alle rum viser analyserne fra Sallinghus, at økonomien i varmegenvinding er *yderst ringe* med simple tilbagebetalingstider på op imod 40 år eller risiko for årlige driftsbesparelser, der aldrig kan afskrive investeringerne.

Der er undersøgt alternativer til traditionel varmegenvinding, som helt eller delvist udnytter energien i ventilationssystemets afkastluft. Undersøgelserne er bl.a. inspireret af en workshop med ventilationsekspertter og -rådgivere, hvor udgangspunktet for de diskuterede løsninger var energiressourcen varm og fugtig luft fra et udsugningsanlæg leveret på bygningens øverste etage eller tag. Der er hverken krav om eller behov for, at der skal etableres varmegenvinding for al afkastluft, da behovsstyret ventilation sikrer en stor varmebesparelse ved knap en halvering af luftmængden sammenlignet med balanceret mekanisk ventilation. Fokus i undersøgelserne har derfor været mindre omfattende varmegenvindingsløsninger med begrænsede investeringer og årlige driftsudgifter, som ligger *under* værdien af de sparede udgifter til køb af varme, typisk fjernvarme.

Muligheder og udfordring ved varmegenvinding

Det vil være muligt at nyttiggøre afkastluftens høje energiindhold med temperaturer omkring 22 °C og et forhøjet indhold af vanddamp i forhold til udeluften til at opvarme selve bygningen. Før afkastluften erstattes og forlader bygningen, er det oplagt at trække dele af luftens energi ud og bruge den til at erstatte køb af varme. Den klassiske varmegenvindingsløsning, der lader afkastluften forvarme den friske udeluft, som blæses ind i bygningen, er ret effektiv, og selve varmegenvindingen i en varmeveksler er ikke særligt dyr. Det er en velafprøvet varmevekslingsløsning. Den økonomiske udfordring er etablering af selve distributionssystemet, hvor den forvarmede luft skal transporteres til bygningens enkelte boliger og rum, hvilket kræver et omfattende rørsystem.

Ventilation og varmegenvinding – nøgletal for energi og økonomi

Der er en række alternative varmegenvindingskoncepter, som på papiret lyder lovende, men hvor økonomien desværre ikke hænger helt sammen. Mange boligforeninger er tilsluttet fjernvarmesystemer, hvor den variable varmetarif typisk er på 0,6-1 kr./kWh inkl. moms. Det er den mulige økonomiske besparelse pr. genanvendt kWh, som skal dække eventuelle ekstra driftsudgifter samt forrentning og afdrag på lån til investering.

Til sammenligning koster 1 kWh elektricitet godt 2 kr./kWh. Det betyder, at selv ved begrænset brug af elektricitet, fx til transport af forvarmet luft, er de årlige driftsudgifter udfordrede. Priserne på energi betyder således, at elforbruget til drift skal udgøre en besparelse på 2-3 kWh i fjernvarme for bare at gå i nul rent driftsøkonomisk.

Hvor meget energi kan man spare ved at udnytte energiindholdet i den varme afkastluft?

I opvarmningssæsonen er luftens energiindhold i en bygning væsentligt større end udenfor, hvorfor der tabes varme, hver gang 1 m³ luft skiftes.

Bygningsreglementet opererer med to krav: 1) Tilførslen af frisk luft skal som minimum være 0,3 l/s pr. m² opvarmet etageareal (§ 443, stk. 1), og 2) kapacitetskravet til udsugningsventiler er henholdsvis 15 l/s i bad og 20 l/s i køkken (§ 443, stk. 5).

For bygninger med konstant luftskifte, fx balanceret ventilation, er luftskiftet og dermed energitabet direkte knyttet til kapacitetskravet (de 35 l/s, der svarer til et samlet luftskifte på 750.000 m³ i årets otte koldeste måneder, hvor forskellen i energiindhold ude og inde er størst). Hvis der ikke etableres nogen form for behovsstyring og varmegenvinding, vil den mekaniske ventilation påføre lejligheden et samlet energitab i opvarmningssæsonen på 5.000 kWh pr. lejlighed.

Målingerne i Højstrupparken viste, at bygningen med behovsstyret ventilation uden varmegenvinding havde et fjernvarmeforbrug i det første driftsår, der var 10 % højere end bygningen med decentral balanceret ventilation og varmegenvinding. (Det samlede forbrug af primærenergi var dog kun 4-5 % højere som følge af et lavere elforbrug).

For en lejlighed på 75 m² vil kapacitetskravet på 35 l/s svare til 0,47 l/s m², hvortil der kommer luftskifte som følge af utætheder i klimaskærm typisk på under 0,1 l/s m². For behovsstyret ventilation vil luftskiftet være ca. halvt så stort: 0,25 l/s m² med frisk luft tilført via ventiler i klimaskærm, vinduer mv., men også via klimaskærmens utætheder. Det reelle energitab, som varmegenvindingen skal erstatte, er derfor i størrelsesordenen 2.000 kWh/år som følge af luftskifte.

De økonomiske beregninger for varmegenvinding i Sallinghusprojektet viser en tilbagebetalingstid for selve varmegenvindingsdelen på 25-50 år med 0 % rente. Investeringen pr. sparet fjernvarme (kWh/år) må derfor ikke være mere end 20 gange den variable fjernvarmetakst, svarende til maksimalt 15-20 kr./sparet kWh og år, forudsat at der kun er beskedne driftsudgifter forbundet med varmegenvindingen.

Mulige genvindingsprojekter med acceptabel økonomi

Med de snævre økonomiske randbetingelser forekommer det umiddelbart vanskeligt at udpege projekter, hvor varmegenvinding kan levere en økonomi, som kan hvile i sig selv eller endda konkurrere med andre energibesparelser. Økonomisk interessante løsninger kan dog findes, når varmegenvinding kan kombineres med andre projekter og derved fortrænge andre investeringer.

Traditionel varmeveksling – luft til luft

Hvis afkastluften kan anvendes uden større investeringer i distribution, som ved opvarmning af loftsrum mv., kan dette være en mulighed. Dette gælder især hvis der i øvrigt er udfordringer med fugt og temperaturog hvor alternativet fx er nyetablering eller brug af

centralvarme. Hvis løsningen kan fortrænge andre investeringer, kan det blive økonomisk rentabelt at etablere varmegenvinding fra afkastluften.

Tilsvarende gælder ved nyetablering af boliger i bygningers loft/tagetage, hvor opvarmning/ventilering baseret på varmegenvinding er en oplagt og energieffektiv måde at holde en rimelig temperatur og et acceptabelt fugtniveau. Opvarmning af gamle tørrelofter med forvarmet frisk luft vil kunne give en hurtig tørring af vasketøj og en markant energibesparelse, hvis løsningen sammenholdes med eldrevne tørretumblere. Udfordringen er her ikke økonomisk, men snarere at nutidens lejere muligvis betragter dette som utidssvarende.

I dag er der stor fokus på indretning af nye boliger i loftrum/tagetage. Her kan boligopvarmningen sikres via forvarmet luft via ventilation eller lavtemperaturvarme fra luft til vand-varmepumpe. Der er dog en række udfordringer med at udnytte tagetagens kvadratmeter til boligformål, især i relation til indretning af køkken og bad. Direkte opvarmning med forvarmet luft kan komme i konflikt med kravet om, at der i boliger skal være individuel styring af varmen i de enkelte rum. I tilfælde af at loftrum stilles til rådighed for beboernes fritidsaktiviteter, anvendes som mødelokaler osv., forekommer opvarmning med forvarmet luft at være interessant både i et energimæssigt og et økonomisk perspektiv.

De ovenfor nævnte løsninger handler om at bruge den genvundne varme i ejendommens øverste etage, hvor udsugningsanlæggene typisk er placeret. Hvis en ejendom har udfordringer med fugt i kælder eller lave temperaturer i opgange, kan indblæsning af forvarmet luft ligeledes være et alternativ til radiatorer og energiforbrug til opvarmning. Økonomien vil her afhænge af, om der nemt kan føres kanaler eller rør til fremføring af denne varme fra loft til trapper eller kældre.

Varmegenvinding i kombination med varmepumper

Varmevekslere kan typisk levere frisk luft med en temperatur på op til 18 °C. Hvis der er behov for højere temperaturer, er den oplagte løsning at sende den varme og fugtige afkastluft ind i en luft til vand-varmepumpe. En varmepumpe, som forsynes med varm og fugtig afkastluft, kan producere varmt vand med en meget høj energieffektivitet. Ulempen er, at elektricitet som før nævnt er ca. tre til fire gange så dyr som den variable fjernvarmetarif, hvilket betyder, at elregningen risikerer at beslaglægge hele den økonomiske besparelse som følge af en reduceret fjernvarmeregning.

Skift af energibærer fra luft til vand har den oplagte fordel, at energitætheden bliver ca. 3.000 gange større. Det betyder, at det er langt enklere at håndtere og transportere energi rundt i bygningen, når energien er bundet til vand. Varmt vand kan anvendes til at 'genopvarme' ejendommens varme brugsvand og centralvarme. Varmt brugsvand og centralvarme 'produceres' i bygningens kælder, men cirkulerer rundt i alle ejendommens etager og lejligheder. Det giver en teknisk mulighed for at 'genopvarme' det varme vand og centralvarmen, når de respektive rørsystemer passerer ejendommens øverste etage. Rent teknisk kan varmepumpen aflevere det varme vand til beholder/buffertank, som opvarmer enten det varme brugsvand eller centralvarmens returløb. Styring af returløb/blandingsløje ligger i bygningens eksisterende tekniske løsning, hvor varmepumpen leverer et supplement. Når der tilføres ekstra varme til den cirkulerende vandmængde, tolkes dette i styringen blot som, at der er et lavt eller slet intet forbrug.

Den samlede energieffektivitet i et varmt brugsvandsystem ligger typisk på 30-40 %, hvilket især skyldes, at det varme vand cirkulerer rundt i bygningen, lang tid før det bliver tappet. Hvis dele af det varme brugsvand produceres tættere på tappestederne, er der mulighed for at reducere varmetabet. Bemærk særligt, at afkastluftens energiindhold kan udnyttes året rundt til produktion af varmt brugsvand.

Uden for fyringsperioden er den samlede energieffektivitet i varmecentralen særligt lav, da der alene skal produceres varmt brugsvand. Hvis lokal varmtvandsproduktion baseret på

ventilation, solceller og eventuelt solvarme kan overtage den samlede forsyning af varmt brugsvand i sommermånederne, vil varmecentralen helt kunne lukkes. I dag har en række varmecentraler et betydeligt varmetab selv uden for fyringssæsonen, hvilket netop skyldes, at der skal leveres varmt brugsvand året rundt fra de samme anlæg.

En række boligselskaber pålægges i dag ekstra betaling fra fjernvarmen som følge af ringe afkøling, hvor returtemperaturen til net er for høj. I forbindelse med at boligafdelingerne skal investere i udstyr, som sikrer lavere returtemperaturer til nettet, kan det være oplagt at kæde disse investeringer sammen med ventilation/varmepumpe, der leverer varme via centralvarmens returløb. Dette kan kombineres med, at fjernvarmens returløb bruges til at forvarme det kolde vand (10 °C), som anvendes til produktion af varmt brugsvand.

Varmepumper i kombination med solceller

Varmepumpeløsningernes rentabilitet afhænger af de aktuelle elpriser. Økonomien i solceller er rigtig god, forudsat at hovedparten af produktionen kan anvendes internt og dermed fortrænge køb af dyr elektricitet. Egenproduceret elektricitet kan umiddelbart anvendes til ejendomsdrift, men der skal gøres opmærksom på, at brug af afgiftsfri el i lejligheder og til elopladning er underlagt særlige regler og bl.a. har krav om separat organisation med egen økonomi.

Herudover har flere nye projekter svært ved at overholde den samlede energiramme for byggeriet, hvor et stort solcelleanlæg kan være en økonomisk attraktiv løsning sammenholdt med andre energibesparelser, selvom en betydelig del af strømmen må leveres til det offentlige net med yderst beskedent betaling.

Kombinationen af eksisterende solceller og varmepumpe med produktion af varmt brugsvand tegner til at være særligt interessant. Kombinationen solceller og varmepumpe til at levere varme til centralvarme er dog mere tvivlsom, da solcellernes elproduktion er særligt høj i sommerhalvåret, hvor behovet for rumopvarmning er beskedent, og kun giver et beskedent bidrag til centralvarmeproduktion om vinteren, hvor behovet er stort.

Dispensation fra energikrav

Bygningsreglementet har med de ændringer, der er beskrevet på side 12-13, åbnet op for alternativer til balanceret ventilation med varmegenvinding. Kravet er blot, at de alternative løsninger lever op til de gældende krav for indeklima mv., samt at det samlede forbrug af primærenergi ikke bliver højere. Ved beregning af primært energiforbrug skal følgende korrektionsfaktorer benyttes:

- fjernvarme: 0,85
- elektricitet: 1,9.

Ved behovsstyret ventilation nedsættes luftskiftet ganske betydeligt i forhold til ventilation med konstant luftskifte, som skal være indreguleret til kapacitetskravene. Dog viser det 4-5 % højere forbrug af primærenergi det første år, efterfulgt af en stigning de følgende år på 8-9 %, at behovsstyret ventilation uden varmegenvinding ikke fuldt ud kan matche det lavere primære energiforbrug ved balanceret ventilation med varmegenvinding.

Hvis det aktuelle projekt ikke har særlige muligheder for at anvende den genvundne energi i afkastluften for en rimelig økonomi, kan der søges om dispensation hos kommunen.

En dispensationsansøgning i forhold til energikravet kan begrundes med:

- at behovsstyret ventilation med en avanceret styring kan give en ganske betydelig energibesparelse, som følge af at luftskiftet reduceres markant, men at der fortsat er et merforbrug af primærenergi i størrelsesordenen 4-11 % i forhold til balanceret ventilation med varmegenvinding
- at den driftsøkonomiske besparelse ved balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding er begrænset af den lave variable fjernvarmetarif
- at omfattende omkostninger til etablering af traditionel varmegenvinding eller anden varmegenvinding af afkastluften kan have manglende rentabilitet for boligafdelingerne.

Dispensation fra krav om luftskifte i intervallet 0,15-0,3 l/s m²

Bemærk, at et forudsat luftskifte på 0,25 l/s m² ved behovsstyret ventilation og dermed knap en halvering af den ventilerede luftmængde forudsætter en effektiv styring i kombination med en dispensation fra de gældende bestemmelser om luftskifte i intervallet 0,15-0,3 l/s m².

I følge bygningsreglementet, kan automatisk ventilationsstyring baseret på måling af relativ fugt og CO₂ tillade et luftskifte under det generelle krav på 0,3 l/s m² og helt ned til 0,15 l/s m². Kravet er dog, at boligen er tom, hvortil kommer, at den ekstra energibesparelse kun må medregnes for 30 timer pr. uge.

Erfaringerne fra de igangværende demonstrationsprojekter dokumenterer, at luftskiftet i perioder kan reguleres ned under de 0,3 l/s m², selvom der er personer til stede. Hertil kommer, at dette gælder for mere end 30 timer.

På denne baggrund kan boligafdelingen vælge at søge kommunen om dispensation fra de særlige krav om at ventilere i intervallet 0,15-0,3 l/s m².

En dispensationsansøgning i forhold til krav om ventilation i intervallet 0,15-0,3 l/s m² kan begrundes med:

- at fortløbende måling af relativ luftfugtighed og CO₂ gør det muligt for såvel driftsorganisation som beboere at få dokumenteret, at ventilationssystemet leverer et godt indeklima
- at fortløbende måling af indeklima med automatisk styring og VAV-spjæld sikrer, at luftskiftet opreguleres hurtigt, når koncentrationen af CO₂ eller fugt stiger
- at der er en betydelig energibesparelse i at reducere luftskiftet til ned under de 0,3 l/s m², selvom der er personer til stede i boligen, herunder når der luftes ud, og når emhætten er i brug.

8 DISKUSSION

De aktuelle analyser i denne rapport undersøger forskellige forhold ved behovsstyret udsugningsventilation, hvor de enkelte analyser er baseret på erfaringer eller beregninger fra de forskellige projekter. Selvom alle demonstrationsprojekterne omhandler ældre, muret etagebyggeri, er renoveringsprojekterne kontekstuelte forskellige, og de enkelte byggesager har haft forskelligt fokus afhængigt af en række interne og eksterne forhold. Herudover er der grundet den løbende deling af erfaringer mellem projekterne opstået ny indsigt hen ad vejen. Da det udfordrer vanetænkning og normer, kan udvikling og innovation som i demonstrationsprojekterne også opleves usikkert. Hvor renoveringsprocessen i ét af de tre demonstrationsprojekter er afsluttet eller i de afsluttende faser, har der ved de øvrige igangværende demonstrationsprojekter været fokus på at indarbejde ventilationskonceptet fra de tidlige faser – i kravspecifikationer, aftalegrundlag og nye tilhørende driftspraksisser. Herudover vil tilgrænsende aspekter som miljøpåvirkning, håndtering af afkastluft og boligkvalitet, der bliver undersøgt på ny i lyset af behovsstyring, også medføre en revurdering af de eksisterende, mere etablerede ventilationskoncepter. Disse erfaringer giver et sammensat billede af, hvordan ventilationskonceptet kan se ud, når det indgår i et givent renoveringsprojekt og indlejres som en optimering af den samlede bygningsteknologi. Selvom konceptet for behovsstyret udsugningsventilation bygger på traditionelle udluftningsprincipper, er det især styringen og de nye muligheder for og krav om at følge det reelle ventilationsbehov fremfor et beregnet, der skal finde sin form og leje i branchen.

Aktualitet

Gennem projektperioden har der været en række globale hændelser, der har haft betydning for konceptets aktualitet. Krigen i Ukraine fra foråret 2022 resulterede i en drastisk stigning i energipriser og risiko for forsyningsudfordringer. Den målte gennemsnitlige stuetemperatur i Højstrupparken på 22 °C svarer til målinger i andre etageejendomme (Andersen, Trotta & Gunnarsen 2022), men grundet de aktuelt høje energipriser og udfordringer med energisystemernes kapacitet var de generelle anbefalinger i vinteren 2022-2023 at holde en stuetemperatur på kun 19 °C. Den medfølgende risiko for fugtproblemer ved de lavere temperaturer kan forebygges gennem behovsstyring, der sikrer, at den relative fugt er på et passende niveau for den enkelte lejlighed, uanset beboernes valg af stuetemperatur.

Mere kritiske hændelser som ekstremvejr, spredning af virus eller lokal forurening taler også for den lokale behovsstyring, der kan tage højde for det specifikke vejr eller den aktuelle forurening. Konceptet kan eksempelvis udvides til fx at inkludere andre målinger eller blot opregulere luftmængder via de centrale styringsalgoritmer. Herunder i tilfælde af forhøjet risiko for spredning af virus, lokal forurening eller ekstra ventilation efter installationsarbejder og nye materialer inde i bygningen.

Skalerbarhed: varmegenvinding, klimapåvirkning og økonomi

De tre projekter, som undersøgelsen baseres på, har alle fået dispensation fra kravet om varmegenvinding og en konstant høj udelufttilførsel. De teoretiske beregninger og driftsmålinger viser, at behovsstyret ventilation uden varmegenvinding giver en forøgelse af

primært energiforbrug på 4-11 %. For at kunne overføre erfaringerne til renoveringsprojekter i almindelighed har vi undersøgt alternative veje til at opnå varmegenvinding og dermed opfylde gældende krav.

Udnyttelse af overskudsvarme er et felt i rivende udvikling, hvor der i industrien omkring varme- og energiproduktion samt industrien generelt (fx de store datacentre) arbejdes på at udnytte lokale energikilder. Innovationsprocesserne er stadig i de tidlige faser, især for lavtemperatur (< 60 °C), men udviklingen støttes typisk ved 'gulerod' (rammevilkår med støtte) eller 'pisk' (gebyrer og afgifter). Rapportens beregninger er blot øjeblikbilleder, hvor varmegenvindingsøkonomi i en varmepumpe er meget afhængig af elpriserne og forholdet mellem el- og varmepriser. Der skal dog større ændringer i de danske energiafgifter til for at ændre billedet af, at økonomien i supplerende varmegenvinding generelt er ringe, medmindre projekterne kan fortrænge andre investeringer. Hvis man kan udnytte tidspunkter med lavere elpriser i kombination med solceller, kan der potentielt være besparelser. Denne type af hybridløsning på tværs af varme, vand og ventilation vil formentlig være fokus for energioptimering i de kommende år.

I dag spiller miljøvurderinger en større rolle i projekteringen, hvilket også kan få betydning for valget af ventilationskoncepter i en given renovering. For at imødekomme de nye krav udvikler producenterne miljøvaredeklarationer, EPD'er, der bl.a. angiver forventet levetid for deres produkter. Der udvikles også branchestandarder, der dækker specifikke elementer. Dog betyder den nye branchestandard for ventilationsaggregater og -kanaler, at disse klassificeres med 25 og 50 års levetid, der svarer til bygningsreglementets krav, men samtidig kan vanskeliggøre kvalificerede valg på komponentniveau. En tidligere skelnen i levetid for centrale og decentrale anlæg er i dag harmoniseret, og <25 år gælder samlet for begge aggregater. Rapportens LCA-analyse indeholder overvejelser omkring detaljeringsgrad, bøjninger, afgreninger mv., der ikke i dag er dokumentationskrav til i bygningsreglementet, men som vurderes at kunne bidrage til valg af ventilationskoncept – i samspil med den aktuelle samlede bygningsteknologi. Ud over materialers og produkters levetid er det for lejeboliger afgørende også at vurdere anlæggenes driftsomfang. En øgning af driftsopgaver, der kræver adgang til boligerne, er tidskrævende og kan nogle gange vise sig besværligt med hensyn til beboernes privatliv. I en bredere bæredygtighedsforståelse, hvor også de sociale aspekter vægtes, vil privatliv, komfort og bevaring af nyttigt boligareal også være argumenter for at vælge den undersøgte behovsstyrede ventilationsløsning.

Videreudvikling i demonstrationsprojekterne

Renoveringsprojekter er i høj grad kontekstspecifikke, hvilket demonstreres i de tre eksempler i rapporten: Højstrupparken, Sallinghus og Solhusene. De egnede løsninger for ventilation afhænger af bygningstypologi, mulighederne i eksisterende og nye føringsveje og ventilationsprincipper, men også af det overordnede renoveringsprojekt. I det igangværende renoveringsprojekt var responstiden for kort, til at det markant kunne rykke ved de allerede forhandlede entrepriseaftaler vedrørende leverancer, ydelser og byggelogistik i forbindelse med forhåndsvalget af balanceret mekanisk ventilation. Erfaringsopsamlingen på tværs af de tre demonstrationsprojekter omkring proces, implementering og drift har også været begrænset af den forskudte færdiggørelse. I forhold til de tre demonstrationsprojekter er en af de store forskelle, at renoveringen i Højstrupparken blev igangsat med balanceret ventilation, hvor demonstrationsprojektet kom ind som et delprojekt meget senere i processen. Det blev i høj grad boligforeningen, der skulle overtale rådgiver og entreprenør, og det var et sats i den planlagte byggepladslogistik og det entreprisetilbud, der var blevet givet. Desuden fik de 15 husstande en anden løsning end de øvrige, hvorfor man valgte at holde igen med information om løsningen. I de to andre projekter har renoveringen fra start

haft det behovsstyrede anlæg som ventilationsløsning for samtlige lejligheder. Her er demonstrationsprojekterne stødt på andre udfordringer såsom usikkerhed vedrørende grænseflader mellem måleteknologi og ventilationsteknik. I den videre projektperiode vil det være relevant at følge arbejdet omkring udbudsfasen. Tiden vil vise, hvorvidt det lykkes de kommende projekter at lande en systemleverance omkring styring og automatik eller delleverancer, hvor teknik, styring og kommunikation er opdelt, men koordineres i egen driftsorganisation. Der er behov for nytænkning i grænsefladerne mellem teknik, software og nye driftsopgaver, når det gælder ventilationsløsninger i optimering af eksisterende etageboliger.

Nye opgaver og ansvarsområder ved styring og automatik

Produktudvikling og innovation kan sætte et markeds modenhed på prøve. Ved behovsstyret ventilation er der udbudspraksisser, der skal stabiliseres, med etablering af nye grænseflader og udvikling af nye aftalegrundlag. Nye alternative løsninger åbner også op for diskussion omkring ventilationskoncepter generelt: For eksempel viser udfaldet af det ene decentrale balancerede ventilationsanlæg i Højstrupparken, som har været slukket, at der findes faldgruber også i eksisterende balanceret ventilation. Herudover har aktuelle byggesager omfattet vurderinger af nye performancekrav til emhætter og lokale vurderinger af løsninger, hvilket får betydning for de valgte løsninger. Branchens fokus på klimaaftryk og energiforbrug skubber ligeledes til udviklingen samt et voksende marked for måleteknologier og sensorstyring.

Behovsstyring fordrer dels udformning af nye aftalegrundlag med leverandør, serviceaftaler med udbyder samt nye interne praksisser for datahåndtering i den lokale driftsorganisation. Efter første års drift i Højstrupparken og inden igangsættelse i Solhusene gik udbyderen af cloudløsningen konkurs i efteråret 2022 og blev senere opkøbt af andre aktører. De seneste målinger fra Højstrupparken, som er beskrevet på side 36-37, tyder på, at feedbackmekanismerne med alarmer og dertilhørende beredskab ikke har fungeret optimalt. Dette har dog ligget uden for den aktuelle undersøgelse, men det vil være relevant at genbesøge disse aftaler. I Højstrupparken var indeklimamålerne afprøvet i et lille udsnit af den større renovering, med kun 5 % af den aktuelle boligafdeling og halvdelen som kontrolgruppe til den behovstilpassede ventilationsløsning. Det er derfor relevant at følge de øvrige projekters udbud og kravspecifikationer på automatik og målesiden.

Indkøbsvejledning for behovstilpasset udsugningsventilation i eksisterende etageboliger (Øien m.fl. 2023) søger at rammesætte de aktuelle forhold omkring ansvar og opmærksomhedspunkter omkring både byggesagsbehandling og kravspecifikationer af løsningen, herunder at der bør udvikles sags- og forretningsgang for tilhørende it-systemer samt for beredskab til både rutinemæssige og mere uforudsete hændelser.

Det primære formål med måling af indeklima og styring af luftskifte i den enkelte lejlighed er at sikre et godt indeklima og et lavt energiforbrug, hvor det er et mål i sig selv, at bygningens brugere og driftspersonale kan handle på baggrund af viden om de faktiske forhold. I Højstrupparken er tilpasningen og dialogen om trækgener og manglende kendskab til den nye ventilationsteknologi ikke sket som en del af en struktureret inddragelsesproces, men som tilfældigt opståede work-arounds af beboere og tilfældigt tilgængelige håndværkere. Hvis man derimod kunne arbejde med at oversætte de monitorerede aspekter af indeklimaet og støtte beboerne i, hvordan de selv kan holde øje med henholdsvis målinger og mere oplevelsesmæssige aspekter af indeklimaet, ville denne viden komme mere i spil.

Der er endvidere et indlejret paradoks i datastyrede teknologier, da data bliver en ressource, der kan høste goder, men samtidig afhænger disse goder af, at systemerne fungerer korrekt. Enkeltstående data er i sig selv neutrale, men hvordan de forvaltes og bruges, vil få indvirkning på den sammenhæng, de fungerer i. Da indeklimadata kan fungere

som argumenter i en sagsgang, er det vigtigt at være klar over, hvad i indeklimaet de repræsenterer. Her vil det typisk være de målbare data for CO₂, fugt og temperatur, der kun beskriver dele af det fulde billede. Målinger vil være øjebliksbilleder, hvor kvalitet og performance af måleinstrumenter, disses placering og indregulering også har betydning. Data giver værdi gennem måden, de håndteres og forvaltes på. De kan være med til at gøre indeklimaet synligt og dermed kvalificere valg i hverdagen, der på sigt kan forebygge problemer (både for drift og for beboere), men de kan også være en barriere for dialog og samarbejde, hvis de blot anvendes som kontrolmekanismer. Af persondatasikkerhedsmæssige årsager skal data selvsagt ikke ende i de forkerte hænder, men en konstruktiv styring, der støtter samarbejdet mellem drift og praksis, kræver transparens, forventningsafstemning samt ressourcer til at gribe henvendelser, hvor der også kan være behov for oplæring og opfølgning, hvad angår at læse måleresultater.

De foreløbige resultater fra demonstrationsprojekterne kan ikke generaliseres til at gælde alle renoveringer, og det kontekstafhængige betyder, at enhver renovering bør tage udgangspunkt i de aktuelle forhold. Bilag 1 med styringsalgoritmerne vil dog være et solidt udgangspunkt for projekter, der ønsker at implementere behovsstyret ventilation. Automatikken er som det overordnede ventilationskoncept heller ikke en nyskabelse som sådan, men består af hyldevarer, der er kendt fra andre områder af bygningsautomatik. Sensorteknologier og datastyring er et område i rivende udvikling, og selvom det tager tid at mobilisere nye aktører for udbud af styringsteknologier på boligmarkedet, forventes digitaliseringen af både forbrug og performance at vinde indpas inden for en overskuelig fremtid.

Indeklimaets rolle i hverdagen – merværdi

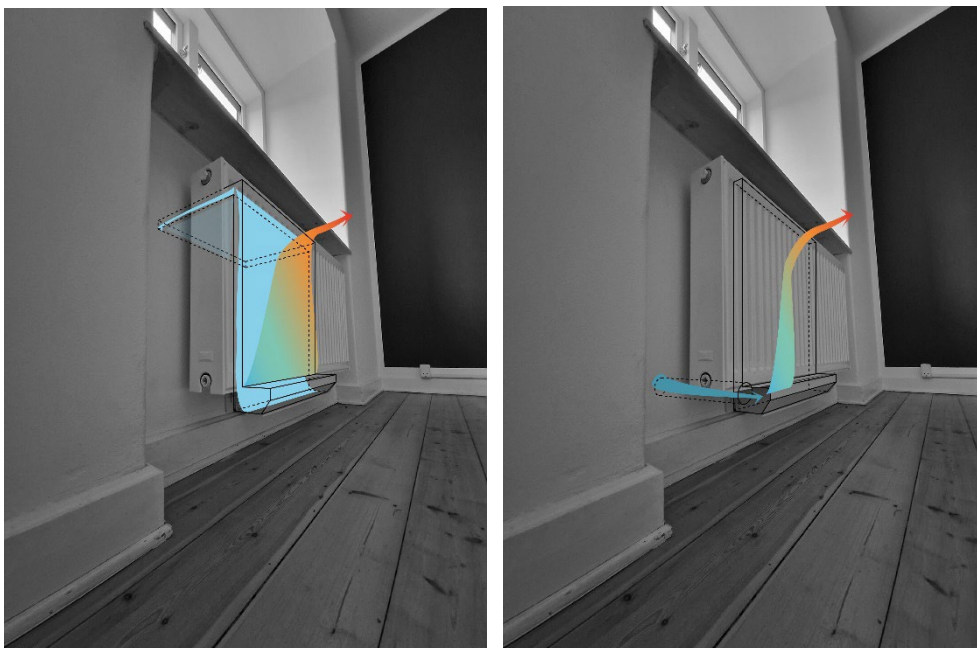
Nogle afledte effekter af renoveringsindsatserne kan først observeres efter et stykke tid. Det gælder eksempelvis drifts- og hverdagspraksisser. Der skal man igennem en implementeringsfase, inden de eventuelle ændringer viser sig. I Højstrupparken vil vi få mulighed for at sammenligne eventuelle effekter af behovsstyret og balanceret mekanisk ventilation på beboeres og driftspersonales praksisser omkring indeklima. De overordnede erfaringer fra det tilgrænsende forskningsprojekt Be Ready viser dog, at beboerne ikke nødvendigvis ændrer adfærd som følge af en renovering (Gabel 2022). Men da behovsstyret ventilation i teorien vil fungere bedre sammen med etablerede udluftningspraksisser (åbning af vinduer og døre) end mekanisk balanceret ventilation, vil dette være interessant at undersøge nærmere i den videre projektperiode. Herudover vil det være oplagt at undersøge andre komfortparametre som støj, termisk komfort og lugt blandt et bredere udsnit af beboere.

Kontekstspecifikke overvejelser for delkomponenter

Luftindtagets placering og betydning for komfort

En af de kontekstafhængige variable, der med fordel kan undersøges nærmere, er luftindtagets udformning og placering i facaden. Dels i forhold til facadeudtryk i murede byggerier, dels i forhold til udformning, rumfang, ydelse og placeringens betydning for eventuelle trækgener indenfor. For trækgener gælder det både lufthastighed og luftindtagets placering i forhold til de aktiviteter, der foregår i det aktuelle rum. Figur 25 illustrerer de to typer af luftindtag: det cylinderformede i Højstrupparken, hvor luften kommer ind i gulvhøjde og føres op gennem/bag radiatoren, og i Sallinghus, den smallere, rektangulære spalte i underkanten af vinduet, hvor luften føres ned langs indersiden af ydervæggen, inden den varmes op gennem radiatoren. Betydningen af disse forskelle i geometri og placering for luftbevægelsen er ikke undersøgt videre, men vil være relevant at sammenholde med andre typer af luftindtag i den aktuelle løsning. I Solhusene er luftindtaget i den ene del af

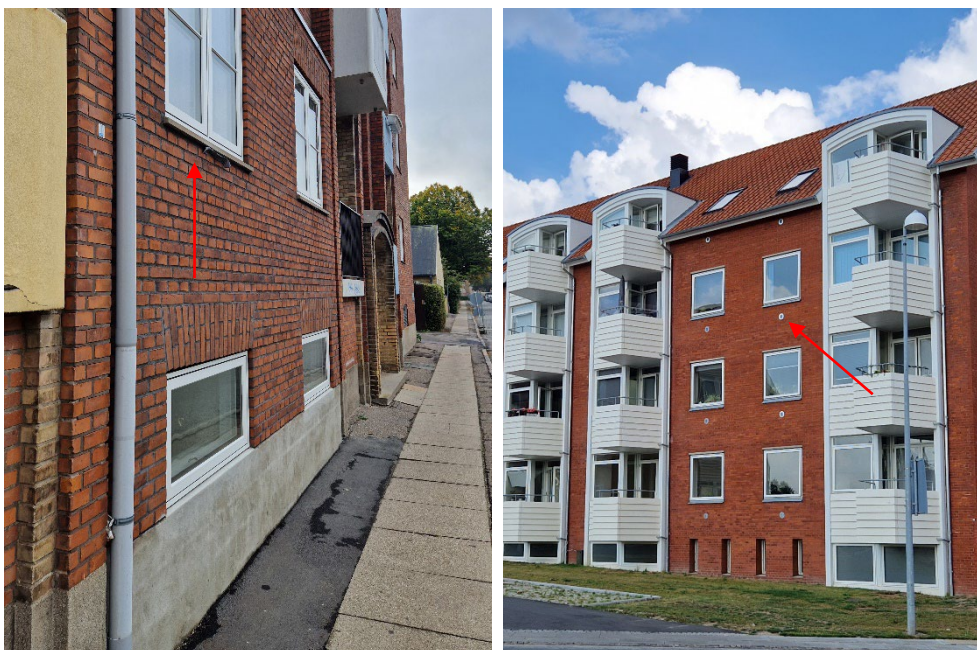
bebyggelsen etableret ved ventilationsvinduer, der kan være en gunstig løsning i kombination med den behovsstyrede ventilation, hvis vinduerne alligevel skal skiftes.



Figur 25. Principper for placering og udformning ved etablering af luftindtag til behovstilpasset udsugningsventilation. Fotocollager: Turid Borgestrand Øien.

Luftindtagets placering og udtryk i den eksisterende facade

Hensyn til den aktuelle bebyggelse og eventuelle hensyn til løsningens betydning for det arkitektoniske greb, bevaringsværdighed, komfort og brugbarhed spiller en stor rolle for den konkrete udformning. Åbningernes placering i facaden ses i figur 26: Sallinghus t.v. og Højstrupparken t.h. Her kunne man med fordel udvikle et løsningskatalog med forskellige typer af murværk og løsninger.



Figur 26. Luftindtagets udformning og placering i facaden. Fotos: Turid Borgestrand Øien.

9 OPSAMLING

Danmark har en lang tradition for at energioptimere, hvor energiforbruget tilpasses det aktuelle behov. Det gælder særligt ventilation af kontorer og undervisningslokaler, hvor der er tradition for at variere luftskiftet efter det aktuelle behov. Boligventilation har ikke helt fulgt med denne udvikling, hvor boliger ventileres med et fast luftskifte pr. m² eller pr. køkken og badeværelse i mindre boliger, uanset om der er mange, få eller ingen personer til stede i boligen. Det faste luftskifte kan resultere i både over- og underventilering med afledt risiko for energispild eller ringe luftkvalitet.

Forbedring af ventilationsforhold er et mål i de fleste renoveringer af eksisterende etageboliger. Med behovstilpasset udsugningsventilation i den enkelte lejlighed – baseret på ventilationsystem med udsugning forsynet med spjæld, automatik og sensorer – understøttes en automatisk tilpasning af luftskiftet til det faktiske behov (med justeringer hvert femte minut). Dette kan sikre det nødvendige luftskifte og forhindre overventilation med tilhørende energispild. Hertil kommer, at systemet også med indeklimamålerne kan dokumentere indeklima, luftmængder og energitab som hjælp til effektiv bygningsdrift.

De aktuelle demonstrationsprojekter indikerer, at beboerne, på trods af mindre trækgener i indfasningen, ser positivt på en ventilationsløsning med behovstilpasset udsugningsventilation. Bibeholdelse af nyttigt boligareal og fraværet af gener som støj trækkes frem som særlige styrker ved ventilationskonceptet. Herudover tilvejebringer den behovsstyrede ventilation kun det luftskifte, som beboerne ikke selv leverer. Når beboerne selv lugter ud, drosler den mekaniske ventilation automatisk ned.

Behovsstyret ventilation er interessant, fordi installationsarbejdet inde i boligerne begrænses, samtidig med at investeringen reduceres i forhold til balanceret ventilation. Energiberegningerne og de foreløbige driftserfaringer viser, at behovsstyret ventilation uden supplerende varmegenvinding har 4-11 % højere primært energiforbrug end balanceret ventilation med varmegenvinding.

Selvom livscyklusvurderingen viser et 9 % lavere klimaaftryk for behovsstyret boligventilation end for balanceret ventilation, skal der i dag for behovsstyret ventilation enten sikres to kommunale dispensationer i forhold til bygningsreglementet eller én dispensation i kombination med begrænset supplerende varmegenvinding.

Det er vigtigt at følge demonstrationsprojekterne, da der løbende opbygges nye erfaringer. På nuværende tidspunkt især i forhold til aftaler og grænseflader i leverancerne omkring feedbackmekanismer og beredskab omkring automatik, datastyring og monitorering i driftsfasen samt brugererfaringer både fra boligorganisationerne og fra beboerne efter de første års drift.

10 LITTERATURLISTE

- Afshari, A., B. Rasmussen, H. N. Knudsen m.fl. (2020). *Hvidbog – Ventilation af eksisterende etageboliger. Erfaringsopsamling og anbefalinger*. BUILD-rapport:12. København: Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet.
- Aggerholm, S. (2018). *Bygningers energibehov: beregningsvejledning*. SBI-anvisning bind 213 (6. udgave). København: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Andersen, B., S. Eidorff, L. Hallgreen m.fl. (1982). *Vejrdata for vvs og energi – Dansk referenceår TRY*. SBI-rapport 135. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Andersen, R. K. (2013). *Erfaringer fra projekt Dynamisk varmeregnskab*. Center for Indeklima og Energi, Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet.
- Andersen, R. K., G. Trotta & L. Gunnarsen (2022). *Evaluering af projekt Dynamisk varmeregnskab: kvantitativ del*. Institut for Miljø og Ressourceteknologi, Danmarks Tekniske Universitet.
- Artelia (2023). *Emissionsfaktorer for el, fjernvarme og ledningsgas for 2025-2075*. Aarhus: Artelia.
- Balouktsi, M. & H. Birgisdottir (2023). *Analysis of new modules in connection with calculation of the climate impact of buildings* (1. udgave). BUILD-rapport bind 2023 (nr. 23). Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet.
- COWI (2020). *Opdaterede emissionsfaktorer for el og fjernvarme*. Kongens Lyngby: COWI.
- Danmarks Statistik (2024). *BYG42: Byggeomkostningsindeks for boliger (2015=100) efter hovedindeks, delindeks, art og enhed (AFSLUTTET)*. Danmarks Statistik.
<https://www.dst.dk/da/Statistik/emner/erhvervsliv/byggeri-og-anlaeg/indeks-for-byggeri-og-anlaeg> (lokaliseret den 06.06.24).
- El Hamid, M. M. A., M. Stramarko & M. Heckova (2022). *Assessment of embodied carbon of ventilation systems and their components in educational and office buildings*. Kandidatspeciale. Aalborg Universitet.
- EUDP Sekretariatet (2014). *Resultater og erfaringer fra energirenovring af Ryegade 30*. EUDP Sekretariatet.
https://energiforskning.dk/sites/energiforskning.dk/files/slutrapporter/64009-0233_slutrapport_inkl._delrapport2.pdf (lokaliseret den 13.06.24).
- Gabel, C. (2022). Telefoninterview med Charlotte Gabel, Institut for Folkesundhed, Aarhus Universitet og projektdeltager i Realdanias Be Ready-projekt i Højstrupparken, juli 2022.
- Gunnarsen, L. (2011). *Energibesparelser og indeklima. I: Tænk sundhed ind i miljøet*.

- Et prioriteringsværktøj og inspiration til kommuners forbyggende indsats.*
Sundhedsstyrelsen. <https://www.sst.dk/-/media/Udgivelser/2011/Publ2011/SURA/Miljoe/Taenk-sundhed-ind-i-miljoet-Et-prioriteringsvaerktoej-og-inspiration-til-kommuners-forbyggende-indsats.ashx> (lokaliseret den 13.06.24).
- Jantunen, M., O. Fernandes, P. Carrer m.fl. (2011). *Promoting actions for healthy indoor air (IAIAQ)*. Luxembourg: European Commission Directorate General for Health and Consumers.
- Jensen, S. R., C. Gabel, S. Petersen m.fl. (2022). Potentials for increasing resident wellbeing in energy renovation of multi-family social housing. *Indoor and Built Environment*, 31(3), 624-644.
- Jensen, J. B., D. Lindholm & D. Mikkelsen (2016). *Den lille blå om ventilation*. Frederiksberg: Dansk Energi.
- Leitner, F. (2022). Interview med Franz Leitner, projektleder ved Højstrupparken, august 2022.
- Madsen, M. S., A. S. Søvsø & S. Draborg (2016). *Indeklimamåling af to lejligheder ved forskellige ventilationsprincipper*. Taastrup: Teknologisk Institut.
- Müller, J., A. Remmen & P. Christensen (1984). *Samfundets teknologi – teknologiens samfund*. Herning: Systime.
- Olufsen, P. (1984). *Boligventilationssystemer – teori og erfaringer*. SBI-rapport 161. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Orbesen, J. (2020). *Sammen om fremtidens byggeri*. Dansk Industri.
- Tang, J. W., W. P. Bahnfleth, P. M. Bluysen m.fl. (2021). Dismantling myths on the airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 (SARS-CoV-2). *Journal of Hospital Infection*, 110, 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.12.022> (lokaliseret den 13.06.24).
- Videnscenter for Energibesparelser i Bygninger (2023). *Decentral ventilation med varmegenvinding*. Videnscenter for Energibesparelser i Bygninger. <https://byggerienergi.dk/etageejendomme/installationer/ventilation-og-indeklima/decentral-ventilation-med-varmegenvinding/> (lokaliseret den 30.03.23).
- Vogelius, P. (2022). *Internet of Things og Digitale assistenter – muligheder og perspektiver i private udlejningsboliger*. BUILD-rapport 01. København: Aalborg Universitet.
- Zimmermann, R. K., C. M. E. Andersen, K. Kanafani m.fl. (2020). *Klimapåvirkning fra 60 bygninger: Muligheder for udformning af referenceværdier til LCA for bygninger*. Forskning i det byggede miljø. SBI-bind 2020:04. Polyteknisk Boghandel og Forlag. <https://sbi.dk/Pages/Klimapaavirkning-fra-60bygninger.aspx> (lokaliseret den 13.06.24).

Øien, T. B. (2017). *Skimmelsvampevækst i boliger. Praksisser og politikker*. Aalborg: Aalborg Universitetsforlag.

Øien, T. B. & M. K. Rasmussen (2022). Mould, microbes, and microscales of architecture: An anthropological approach to indoor environments. I: Stender, M., C. Bech-Danielsen & A. L. Hagen (red.). *Architectural Anthropology. Exploring Lived Space* (s. 62-75). Oxon: Routledge.

Øien, T. B., G. Wilke, C. F. Sørensen m.fl. (2023). Indkøbsvejledning for behovstilpasset udsugningsventilation i eksisterende etageboliger (1. udgave). BUILD-rapport bind 2023 (nr. 16). Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet.

BILAG 1: STYREALGORITMER TIL BEHOVSSTYRET VENTILATION

Formålet med behovsstyret boligventilation er i videst mulige omfang at opretholde en tilfredsstillende luftkvalitet i den enkelte lejlighed, samtidig med at unødvendig ventilering i perioder med begrænset frigivelse af forurening til indeluften begrænses. Hvis koncentrationen af CO₂ og/eller vanddamp er høj, øges ventileringen med udeluft. Omvendt reduceres luftskiftet, når luftkvaliteten er i orden.

Beregning af, hvor meget udeluft som aktuelt skal tilføres den enkelte lejlighed, kan baseres på en modellering, som beregner det fremtidige behov for luftskifte ud fra fortløbende målinger af luftkvaliteten i kombination med lokale vejrprognoser.

Den fysiske regulering af luftskifte sikres via styrbare ventilationsspjæld (VAV) i lejlighedernes køkken og badeværelse. Kernen i konceptet er et it-system med algoritmer, som for hver cyklus – fx hvert femte minut – beregner det ønskede luftskifte og sender styresignaler til de enkelte spjæld. Spjældene sender dernæst oplysning til styreboks om *faktisk* luftskifte, som i kombination med nye indeklimamålinger er datagrundlaget for næste beregnings cyklus, der udmøntes i nye styreordrer til de to VAV-spjæld. Det er desuden en forudsætning, at den tilknyttede udsugningsventilator styres efter trykket i udsugningskanalen, så undertrykket i kanalen ikke bliver for højt, når mange af spjældene er sat til minimale luftstrømme.

Bilaget præsenterer de beregninger, der muliggør sådan en modelbaseret, proaktiv styring af luftskiftet i boliger.

Samspil mellem luft inde og ude

Mange ældre boliger har udsugningsventilation med aftrækskanaler ført over tag baseret på naturligt aftræk eller med konstant kørende udsugningsventilatorer. Frisk luft trækkes ind i boligerne via luftventiler i vinduer og facader samt via utætheder i klimaskærm.

I nyere etageboliger vil der typisk være et balanceret mekanisk ventilationsanlæg med ét udsugningssystem og ét udeluftsystem, som forsyner boligerne med frisk, forvarmet luft. Typisk vil de to luftstrømme mødes i en varmeveksler, hvor en del af entalpien (luftens energiindhold) i udsugningsluften kan overføres til den tilførte udeluft, så behovet for varmeenergi reduceres. Ved balanceret ventilation er til- og fraluften indbyrdes afstemt og konstant over tid, uanset forureningsniveau.

Absolut og relativ luftfugtighed i indeluften

Kold lufts evne til at optage vanddamp falder hurtigt ved lave temperaturer. Det betyder, at udeluftens absolutte indhold af vanddamp (g/m³) er meget lavt i de kolde måneder. Som konsekvens af ventilering med udeluft er den absolutte og relative luftfugtighed inde i boligen, hvor temperaturerne er mere konstante hen over året, generelt lavere om vinteren end om sommeren.

Udeluften lægger et grundniveau for fugtniveauet i boligen, hvor beboernes stofskifte og aktiviteter tilfører ekstra fugt. Når luftfugtigheden i en bolig er høj, skal der fjernes

vanddamp, hvor skifte af hver m² luft fjerner nogle gram vanddamp svarende til forskellen mellem absolut luftfugtighed inde og ude.

Hvis forskellen i absolut luftfugtighed inde og ude er stor, skal man skifte en væsentlig mindre mængde luft for at komme af med en given mængde vanddamp – sammenholdt med tidspunkter, hvor udeluften indeholder mere vanddamp.

I timer med særligt høj luftfugtighed ude, fx med regnvejr på varme dage, kan udeluften indeholde mere vanddamp end luften inde i boligen. På disse tidspunkter vil et ventilationsanlæg i drift ikke reducere luftfugtigheden i boligen, men rent faktisk få den til at stige.

Ovenstående forhold fører til den konklusion, at en effektiv ventilationsstyring i forhold til fugt bør baseres på såvel indeklimamålinger som data for udeluftens fugtighed. Lokale vejrprognoser kan fx hentes fra Danmarks Meteorologiske Institut⁶ eller Meteorologisk Institutt i Norge⁷ for bl.a. relativ luftfugtighed og temperatur.

Et forhold, som komplicerer det samlede regnestykke, er, at boliger og inventar udveksler fugt med indeluften. Det betyder, at når luftens fugtindhold stiger, akkumuleres en del af fugten i boligen. Når luftens fugtindhold senere falder, afgives fugt atter til luften.

Der kan opstilles klasser for indeklimakvalitet med skala for godt, mindre godt og dårligt indeklima (Andersen m.fl. 2022, som accepterer en højere relativ luftfugtighed i sommerhalvåret (Gunnarsen m.fl. 2021).

TABEL 27. Skala for indeklimakvalitet baseret på relativ luftfugtighed vinter og sommer.

		Relativ luftfugtighed (% RH)			
		Vinterhalvår (01.11-30.04)		Sommerhalvår (01.05-31.10)	
	Godt indeklima	30-50		35-60	
	Mindre godt indeklima	20-30	50-60	25-35	60-70
	Dårligt indeklima	< 20	> 60	< 25	> 70

CO₂-koncentration i indeluften

Styring af luftskifte ud fra CO₂-målinger er mere ligetil, idet CO₂-niveauet ude ikke udviser årstidsvariation. CO₂-koncentrationen er dog langsomt stigende over årene som følge af den globale CO₂-udledning. I år 1986 indeholdt udeluften 350 ppm CO₂, mens udeluften i år 2024 indeholder 420 ppm. Til forskel fra fugt er der ingen markant udveksling af CO₂ mellem luft og boligens materialer.

Bygningsreglementet har ingen eksplicitte krav til CO₂-koncentrationen i boliger. Nedenstående tabel er bl.a. baseret på bygningsreglementets krav til CO₂-koncentrationen i institutioner og andre bygninger, og Andersen (2013) har foreslået følgende skala for anbefalet CO₂-koncentration i indeluft.

TABEL 288. Skala for indeklimakvalitet baseret på CO₂-koncentration i indeluften.

		CO ₂ ppm (hele året)
	Godt indeklima	< 800
	Mindre godt indeklima	800-1.000
	Dårligt indeklima	> 1.000

I lighed med fugt er det forskellen i CO₂-koncentration inde og ude, som er afgørende for, hvor mange m² luft der skal udskiftes, før man kommer ned på en acceptabel koncentration.

⁶ <https://www.dmi.dk>.

⁷ <https://www.yr.no/nb>.

Det betyder fx, at der bortskaffes dobbelt så meget CO₂ pr. ventileret m² ved et CO₂-niveau inde på ca. 1.200 ppm som ved et niveau på 800 ppm.

Partikler og andre gasser samt krav til luftskifte

De primære grunde til at ventilere er at undgå høje koncentrationer af fugt og CO₂, men der er også andre former for forurening i en bolig, som er skadelige eller generende i større koncentrationer. Der er intet i vejen for at supplere målinger af temperatur, luftfugtighed og CO₂-koncentration med andre sensorer, der måler fx partikler, TVOC, NO_x eller radon, om end det kan være omkostningstungt.

I den aktuelle styring indgår måling af fugt og CO₂, der udsættes for parallelle fremskrivninger, og hvor det højeste krav til luftskifte sendes videre til de to VAV-spjæld. Den nedre grænse for udeluftstrømmen er sat til 0,15 l/s m² i forlængelse af en kommunal dispensation fra det generelle krav på 0,3 l/s m². Selvom målinger af fugt og CO₂ åbner op for luftskifte på *under* 0,15 l/s m², er dette udelukket netop af hensyn til andre forureninger.

Luftskiftekrav

Når en bolig tilføres udeluft, blandes udeluften hurtigt med den øvrige luft i boligen. Det betyder, at forureningskoncentrationen falder. Ventilationsstyring handler om at styre luftskiftet, så indeklimaet til stadighed er tilfredsstillende, samtidig med at luftskiftet minimeres for at spare på energien.

Tidligere var ventilationskravene i bygningsreglementet baseret på kravet om en boligventilation på 0,5 /h, dvs. at mindst halvdelen af boligens luftmængde skulle være udskiftet i løbet af én time. I dag er regelsættet baseret på boligens bruttoareal, med et generelt krav om en udelufttilførsel på minimum 0,3 l/s m². Ved en loftshøjde på 2,5 m svarer dette til den tidligere specificering af et luftskifte på 0,5 /h.

Kapacitetskrav og rammerne for variable luftmængder

Ud over minimumskrav til ventilation, jf. de 0,3 l/s m², indeholder bygningsreglementet bestemmelser om, at udsugningsenheden i køkkenet skal have en *kapacitet* på minimum 20 l/s, mens mindstekravet til kapaciteten for udsugning fra badeværelset er 15 l/s, dvs. i alt 35 l/s.

For lejligheder med et areal på op til 116 m² giver et konstant luftskifte ud fra kapacitetskravene et luftskifte, som ligger væsentligt over minimumskravet på 0,3 l/s m². For en lejlighed på 70 m² brutto giver kapacitetskravene et luftskifte på 0,5 l/s m², dvs. 67 % over mindstekravet. Dette skaber stor risiko for 'overventilation' med tilhørende energispild i ejendomme med mindre lejligheder, hvor ventilationssystemet lever op til kravene i bygningsreglementet.

Behovsstyret ventilation overholder de gældende kapacitetskrav, samtidig med at luftmængderne til stadighed vil blive nedjusteret ud fra de aktuelle behov for udeluft. For lejligheder på ca. 70 m² vil en effektiv styring typisk reducere det gennemsnitlige luftskifte til 0,25 l/s m², dvs. en *halvering*. Dette forudsætter dog som nævnt en kommunal dispensation, der tillader, at styringen generelt må regulere luftskiftet ned til 0,15 l/s m².

Forudsætningen for de lave luftmængder, samtidig med at et tilfredsstillende indeklima opretholdes, er et styresystem, som fortløbende måler, dokumenterer og hurtigt tilpasser luftskiftet det aktuelle behov. Baseret på de hidtidige erfaringer anbefales målinger og opdatering af styreordrerne hvert femte minut for at håndtere ændringer i forurening og brugerens aktiviteter, fx mange personer til stede, åbne vinduer eller aktivering af emhætte.

Sidegevinster ved behovsstyret ventilation

Der er nogle vigtige sidegevinster ved etablering af behovsstyret ventilation baseret på indeklimamålere i hver enkelt lejlighed:

- Indeklimaet i de enkelte boliger dokumenteres, hvor beboerne kan få adgang til samtlige data, der vedrører deres bolig, mens driften kun må se nøgletal og månedsstatistik for de enkelte lejligheder.
- De faktiske luftmængder i det samlede ventilationssystem og i de enkelte lejligheder og VAV-spjæld måles. Datagrundlaget kan bruges til at identificere tekniske fejl, herunder spjæld og udsugningsåbninger, som er blokeret.
- Lejligheder med vandskader under udvikling og risiko for skimmelsvamp kan udpeges baseret på måling af lejlighedens relative fugt og den beregnede produktion af vanddamp.
- Forbedret datagrundlag for at vurdere bygningens samlede varmetab, da tab som følge af ventilation kan beregnes ud fra målte luftmængder og det tilhørende entalpitab ved udskiftning af 1 m³ indeluft med 1 m³ udeluft.
- Optimeret styring af varmforsyningens fremløbstemperatur og vandmængde, da der er samlet data om enkelte boligers faktiske stuetemperatur samt lokale vejrprognoser for de følgende døgn.
- Mulighed for at indføre en mere retfærdig fordeling af fælles varmeudgifter, da temperaturen i de enkelte boliger er kendt.

Forskellige former for styring

Der findes en række bud på, hvordan ventilationsanlæg kan styres. Udgangspunktet er, at ventilationsanlæg skal honorere de gældende kapacitetskrav og samtidig være i stand til at reducere luftskiftet, når behovet for frisk luft er mindre. Den simpleste styring opererer med to eller tre niveauer, hvor et ur bestemmer det aktuelle luftskifte. Det var tidligere tilladt, men opfylder ikke længere kravene i bygningsreglementet.

I andre tilfælde aktiveres en flertrinsstyring ud fra målt relativ luftfugtighed, eventuelt suppleret med CO₂-måling. Hvis måleværdierne overskrider nogle på forhånd fastsatte grænser (setpunkter), aktiveres et højere niveau for luftskifte. Ved styring ud fra flere parametre – fx fugt og CO₂ – forøges luftmængden, hvis blot én af de fastsatte setpunkter overskrides. Denne form for ventilationsstyring er udbredt i kontorbygninger og skoler.

En mere avanceret styring er PID, hvor styreordrer for luftmængder beregnes ud fra en tidsserieanalyse af forskellen mellem målinger og de ønskede værdier (setpunkter). Her er der fokus på absolutte afvigelser (P), men også de akkumulerede afvigelser (I) og hastigheden på de målte ændringer, dvs. differentialet (D).

PID-styring kan være oplagt, når det *ikke* er muligt at opstilles en egentlig model for det fysiske system, som skaber behovet for varierende luftmængder, eller hvis man ikke har adgang til relevante målinger og vejrdata.

Prognosemodel for luftskifte

Såfremt man har adgang til hyppige målinger og lokale vejrdata, vil en prognosemodel kunne sikre en styring, som opfylder de opstillede krav til indeklima og med en formodning om et *mindre* luftskifte og energitab sammenholdt med andre former for styring. I det følgende gennemgås principperne i en sådan prognosemodel.

Prognosestyring bygger på en model for den enkelte boligs volumen, aktuelle luftskifte samt luftens forurening med henholdsvis CO₂ og vanddamp (g/m³). Datagrundlaget er oplysninger om boligens størrelse/volumen, aktuelt luftskifte (fra VAV-spjæld) samt hyppige målinger af udviklingen i koncentrationer for CO₂ og fugt (inde og ude). Ud fra ovenstående oplysninger kan behovet for tilførsel af udeluft til fortynding af forureningen beregnes. I prognosemodellen opstilles estimater for aktuel *produktion* af henholdsvis CO₂ og vanddamp.

Prognosemodellen kører i to step. Først beregnes den seneste 'skjulte' produktion af henholdsvis CO₂ og vanddamp, som er årsagen til udviklingen over tid i de målte koncentrationer inde og ude. Dette er muligt, da vi kender det faktiske luftskifte fra VAV-spjæld, indeklimaet samt koncentrationerne af CO₂ og vanddamp udenfor.

Dernæst beregnes det *nødvendige luftskifte*, som skal til, for at koncentrationerne af både CO₂ og fugt kommer ned på et acceptabelt niveau – brugernes setpunkter – inden for kort tid. Beregningen finder det nødvendige luftskifte for at kunne overholde setpunkterne inden for få regnecykler, fx 15 minutter. Tilgangen minimerer energitab og unødvendige udsving i de ventilerede luftmængder, hvor hurtige skift i luftmængder fx kan give uønskede støjgener.

Bemærk, at hvis beboerne i en periode med høj aktivitet med tilhørende produktion af fugt eller CO₂, fx madlavning eller mange personer til stede, åbner vinduer og lugter ud eller starter emhætten, vil prognosefremskrivningen automatisk nedjustere behovet for mekanisk ventilation.

De to beregninger gennemføres hvert femte minut. Alle data, herunder estimeret produktion af CO₂ og vanddamp, gemmes til brug for dokumentation samt for at muliggøre yderligere optimeret styring baseret på historiske mønstre.

Der gennemføres parallelle beregninger for CO₂ og fugt, hvor den beregning, som kræver det største luftskifte, automatisk vælges og omsættes til styresignaler til de to VAV-spjæld. Luftmængden fordeles på lejlighedens to VAV-spjæld, som fra start er indstillet til gældende kapacitetskrav, dvs. 20 l/s for køkken og 15 l/s eller højere for badeværelse. Ved ned- og opregulering justeres de to spjæld synkront, så man undgår, at luften i køkken og badeværelse kommer ud i lejligheden. Idéen med boligventilation er – som tidligere nævnt – at luft fra de øvrige rum forlader boligen via udsugningsspjæld i de to vådrum.

For at sikre en umiddelbar respons, når badeværelset tages i brug, etableres en bevægelsessensor. Når der er personer til stede, justeres VAV-spjældet straks til kapacitetskravet på 15 l/s. Denne 'overstyring', når der er personer i badeværelset, sker uden om den cloudbaserede styring, dvs. uanset de instrukser, som cloudtjenesten sender. VAV-spjæld sender dog hvert femte minut et retursignal til cloud om de faktiske luftmængder.

Styrealgoritmen skal samtidig sikre, at den samlede luftmængde ikke bliver for lav, hvor modellen aldrig må regulere VAV-spjæld under det minimale luftskifte på 0,15 l/s m².

For en bolig på 70 m² er mindstekravet på 0,15 l/s m² lig med 10,5 l/s for de to spjæld. I praksis kan den mindste luftmængde dog blive lidt højere, da de færreste VAV-spjæld kan reguleres ned under 5 l/s.

Typisk har de to VAV-spjæld en minimumsluftmængde på 6-7 l/s, hvor VAV-spjæld i køkken reguleres op til 20 l/s, mens spjæld i badeværelse reguleres op til 15 l/s. Reguleringen er 'synkron', hvilket vil sige, at spjældene indstilles til ens procentandel i forhold til deres minimums- og maksimumsindstilling. I praksis betyder det, at VAV-spjældet i køkkenet altid suger lidt mere luft end spjældet i badeværelset. Det afgørende er dog, at de to spjæld følges ad, så der ikke trækkes luft fra det ene vådrum ud i boligen. Af samme grund skal begge spjæld altid være aktive i reguleringen, selvom det ene spjæld i praksis godt kan levere en minimumsluftmængde på 0,15 l/s m².

Som det fremgår af indkøbsvejledningen, skal styrealgoritmen og kontrolboksen, der er forbundet med ledninger til VAV-spjæld og trykregulering af udsugningsventilatoren, forsynes med 'fall back-løsninger' for tilfælde, hvor kommunikationen svigter, eller der mangler måledata (Øien m.fl. 2023). Spjældene skal i disse situationer automatisk reguleres til de gældende kapacitetskrav, dvs. 20 l/s for køkken og 15 l/s for badeværelse. Det skal ske via cloudens styrealgoritmer, i de tilfælde hvor en indeklimamåler falder ud eller sender åbenlyst forkerte måleresultater, og alene baseret på intern programmering af kontrolboksene, i de tilfælde hvor kommunikationen med cloudcomputeren falder bort.

Data og algoritmer

Styring for CO₂ og fugt

Steady state – balancepunkt for koncentration af CO₂ (eller fugt) mellem produktion og ventilation

Ved en given konstant CO₂-produktion og et konstant luftskifte (n) vil CO₂-koncentrationen i en bolig svinge ind mod et balancepunkt benævnt steady state-niveauet og blive på dette niveau.

I den følgende beskrivelse indgår følgende variable med de nævnte enheder:

CO ₂ Målt(t)	CO ₂ -koncentration til tiden t	ppm
CO ₂ Ude	CO ₂ -koncentration ude, værdi 415 ppm	ppm
ΔCO ₂ (t)	CO ₂ Målt - CO ₂ Ude til tiden t	ppm
CO ₂ Prod	CO ₂ -produktion i boligen	ml/time
V	Boligens nettovolumen	m ³
n	Luftskifte pr. time ift. boligens volumen (V)	/time
t	Tid	time
v	Udeluftstrøm	l/s

For steady state-situationen gælder følgende sammenhæng:

$$\Delta CO_2 = CO_{2Prod}/(n*V) \quad (1)$$

Bemærk, at overkoncentrationen af CO₂ ved steady state er direkte proportional med CO₂-produktion (CO₂Prod) og omvendt proportional med luftskiftet (n).

Fremskrivning af CO₂-koncentration som dynamisk forløb

Når CO₂-produktion og luftskifte er konstant, vil koncentrationen svinge ind mod steady state-værdien. Når én eller begge parametre ændres, vil koncentrationen svinge ind mod et nyt steady state-punkt. Ventilationsstyringen skal netop tage højde for og udnytte den måde, CO₂-koncentrationen (og fugtkoncentrationen) generelt svinger ind mod et steady state-punkt. Dette gælder både, når udgangspunktet er en lavere CO₂-koncentration, og når det er en højere. CO₂-koncentrationen ud over den naturlige koncentration udvikler sig på følgende måde over tid:

$$\Delta CO_2(t) = \Delta CO_2(0)*e^{-nt} + (CO_{2Prod}*(1 - e^{-nt}))/((n*V)) \quad (2)$$

Bemærk, at termen e^{-nt} går fra værdien 1 ved start faldende mod nul ved stigende t , hvilket betyder, at $\Delta CO_2(t)$ går mod $CO_{2Prod}/(n*V)$, dvs. steady state-niveauet.

Til fremskrivningen er der behov for et estimat af CO_2 -produktionen i de nærmeste cyklusser, fx for 15 minutter frem i tid. CO_2 -produktionen kan beregnes for hver cyklus med ovenstående ligning, da vi har oplysninger om de øvrige parametre i ligningen:

$$CO_{2Prod} = [\Delta CO_2(t) - \Delta CO_2(0) * e^{-nt}] * (n * V) / (1 - e^{-nt}) \quad (3)$$

Luftskiftet er VAV-spjældenes målte luftskifte, som er styret af enten CO_2 eller fugt i den foregående beregningscyklus og i øvrigt er begrænset af spjældenes kapacitetsgrænser. Til ovenstående bør der lægges et mindre tillæg for luftskifte via bygningens klimaskærm og beboernes udluftning – infiltration. En typisk anvendt værdi er 0,05 l/s m^2 .

Den opgjorte lufttilførsel i enheden l/s skal omregnes til boligens luftskifte pr. time ud fra boligens nettovolumen:

$$n (/time) = v (l/s) * 3,6 ((m^3/time)/(l/s)) / V (m^3) \quad (4)$$

Én ting er at beregne den aktuelle CO_2 -produktion i den seneste cyklus, en anden ting er at forudsætte produktionen i de kommende femminutterscyklusser. En oplagt hypotese er, at den menneskelige aktivitet er uændret i de nærmeste fem til 15 minutter – dvs. videreførelse af de seneste aktiviteter med dertilhørende CO_2 -produktion. I lyset af at CO_2 -målingerne typisk har en præcision på ca. +/- 30 ppm, anbefales et vægtnet rullende gennemsnit for den beregnede CO_2 -produktion, hvor det seneste estimat gives højeste vægt.

Hvis det aktuelle tidsforløb for CO_2 -produktion ligger tæt op ad gentagne arketyper for udviklingen i den beregnede produktion fra andre døgn, kan disse forløb – i en udvidet model – bruges i korttidsprognosen for CO_2 -produktion. Det kan fx være udviklingen, når der kommer personer til et tomt hjem, eller ved faste rutiner morgen og aften. Dette bilag har dog ikke medtaget algoritmer for implementering af arketyper for tidlige forløb.

Når estimater for CO_{2Prod} i de kommende cyklusser er beregnet, kan den fremtidige CO_2 -koncentration beregnes ved varierende luftskifte $n (/time)$ ved brug af den ovenfor viste ligning (2).

Opgaven er nu at finde det laveste luftskifte, n , som sikrer, at kriteriet for CO_2 -koncentrationen, dvs. brugerens setpunkt, efter fx tre cyklusser (15 minutter) respekteres. Via fx en iterativ beregning findes det luftskifte, $n (/time)$, som bringer CO_2 -koncentrationen ned under det fastsatte setpunkt.

Hvis fx brugernes absolute setpunkt for CO_2 -koncentrationen er 800 ppm, svarer dette til:

$$\Delta CO_2(t = 0,25) = 0,000385 m^3 \text{ eller } 385 \text{ ppm, beregnet som } 800 \text{ ppm inde minus } 415 \text{ ppm ude}$$

Det resulterende luftskifte ($n (/time)$), som sikrer, at den af brugerne satte grænse respekteres efter tre cyklusser (15 minutter), omregnes til l/s og justeres for luftskifte uden om ventilationsanlægget (infiltration). Luftskiftet skal overholde mindstekravet på 0,15 l/s m^2 samt udsugningsanlæggets og VAV-spjældenes kapacitetsgrænser.

Det beregnede luftskifte fra CO_2 -fremskrivningen sammenlignes med den tilsvarende beregning for fugt (se nedenfor) og den højeste værdi, fordeles på lejlighedens to spjæld og sendes som ny styreordre til kontrolboksen og derfra til VAV-spjældene.

Fremskrivning af prognoser for fugt ud fra kendt luftskefte og data for fugt inde og ude

Den parallelle styrealgoritme for fugt følger de samme principper som for CO₂, men er dog lidt mere omfattende.

For det *første* er koncentrationen af vanddamp i udeluften *ikke* konstant, men varierer betydeligt over døgn og år. Det betyder, at effektiviteten ved at fjerne boligens fugt – målt som gram pr. m³ – varierer over tid.

For det *andet* lagres fugt i selve boligen og dens inventar. Det betyder, at vanddamp, som mennesker leverer fra krop og aktiviteter – vask og rengøring – ikke nødvendigvis matcher den aktuelle, forhøjede målte luftfugtighed inde i boligen i forhold til luften udenfor.

Inde- og udeluftens *absolutte* fugtindhold AH (gram/m³) kan beregnes ud fra oplysninger om *relativ* luftfugtighed og aktuel temperatur. Der findes forskellige forslag til omregning, hvor fx nedenstående kan benyttes.

Til beregning af absolut luftfugtighed ud fra relativ luftfugtighed og luftens temperatur indgår følgende variable og konstanter:

<i>Variable</i>		
AH	Absolut luftfugtighed	gram/m ³
T	Temperatur	°C
% RH	Relativ luftfugtighed	% RH

Konstanter

K1	6,112
K2	17,67
K3	243,5
K4	18,02
T0	273,15
K5	100
K6	0,08314

Følgende empirisk baserede formel kan anvendes:

$$AH = (K1 * \exp((-K2 * T) / (T + K3)) * \%RH * K4) / ((T0 + T * K5 * K6)) \quad (5)$$

I beregningerne indgår luftens absolutte indhold af AH (g/m³) inde og ude. AH_{inde} og AH_{ude} kan beregnes ud fra målinger/prognoser for de to parametre relativ luftfugtighed og temperatur. Vejrtejenester leverer timeprognoser for relativ luftfugtighed og temperatur, som interpoleres ned til mindre tidsintervaller.

Det er *forskellen* i vandindhold (gram/m³) inde og ude, som bestemmer, hvor meget vanddamp et luftskefte på 1 m³ fjerner. I lighed med CO₂ vil menneskelige aktiviteter generelt skabe en overkoncentration af vanddamp inde, men i løbet af året vil der være tidspunkter, hvor den absolutte luftfugtighed er højere ude end inde. I disse timer vil ventilation forhøje den absolutte og relative luftfugtighed i boligen. Af samme grund skal ventilationsberegningen i forhold til fugt ved vandindhold i udeluften, der overstiger indeluftens indhold, aflevere mindst muligt luftskefte svarende til 0,15 l/s m².

I følgende beskrivelse af håndtering af luftfugtighed i den modelbaserede styringsalgoritme indgår følgende variable:

$\%RH_{Inde}(t)$	Relativ luftfugtighed inde	%
$\%RH_{Ude}(t)$	Relativ luftfugtighed ude – vejrprognose	%
$Temp_{Inde}(t)$	Temperatur inde	°C
$Temp_{Ude}(t)$	Temperatur ude – vejrprognose	°C
$AH_{Inde}(t)$	Absolut luftfugtighed inde	gram/m ³
$AH_{Ude}(t)$	Absolut luftfugtighed ude	gram/m ³
$AH_{Prod}(t)$	Produktion af vanddamp inde	gram/time
V	Boligens nettovolumen	m ³
n	Luftskifte pr. time ift. nettovolumen	/time
t	Tid	time

I lyset af at luftfugtigheden ude varierer, er 'driveren' for ændringer hen imod en steady state-værdi for absolut luftfugtighed forskellen i absolut luftfugtighed inde og ude, dvs. $AH_{Inde}(t) - AH_{Ude}(t)$ og den aktuelle produktion, $AH_{Prod}(t)$. Dette svarer til, at det tilsvarende udviklingsforløb for CO₂-koncentration styres af forskellen i CO₂-koncentration inde og ude samt den aktuelle produktion af CO₂ inde.

Boligens nettoproduktion af vanddamp (AH_{Prod}) til boligens luft beregnes efter de samme principper som for CO₂, jf. (2) ud fra følgende:

$$AH_{Inde}(t) = (AH_{Inde}(0) - AH_{Ude}(0)) * e^{-nt} + (AH_{Prod} * (1 - e^{-nt})) / (n * V) + AH_{Ude} \quad (6)$$

Først estimeres nettoleverance af vanddamp til boligens luft, jf. (3):

$$AH_{Prod}(t) = [AH_{Inde}(t) - AH_{Ude}(0) - (AH_{Inde}(0) - AH_{Ude}(0)) * e^{-nt}] * (n * V) / (1 - e^{-nt}) \quad (7)$$

Supplerende styring for fugt

Ved høj fugtproduktion stiger ikke blot koncentrationen af vanddamp i luften; der bindes også fugt i bygningen og boligens materialer. Det betyder, at vi her opererer med et system, hvor luften kan modtage fugt fra menneskers umiddelbare aktiviteter, men også fugt, som tidligere er tilført boligen. Det er i princippet muligt at opstille en model for denne ekstra dimension med et fugtlager, som udveksler vanddamp med boligens luft, men der er betydelig usikkerhed i kalkulationerne.

Som alternativ anbefales en model, som opererer med to setpunkter for relativ luftfugtighed i lejligheden. Det højeste setpunkt afspejler kritisk relativ luftfugtighed, som skal søges afhjulpet straks, dvs. inden for fx 15 minutter, dvs. identisk med styring af CO₂.

Det lavere setpunkt for relativ fugt er grænsen for *uønsket* – men ikke kritisk høj – relativ luftfugtighed, som skal fjernes i løbet af timer eller maksimalt et døgn. Her er metoden, at bortskaffelsen af fugt, som ligger mellem de to setpunkter, primært skal fjernes fra boligen i timer, hvor udeluftens indhold af vanddamp er lavt. Dermed opnås den størst mulige bortskaffelse af vanddamp målt pr. m³, da det er forskellen i absolut luftfugtighed inde og ude, som er styrende for, hvor meget vanddamp som luftskiftet fjerner fra boligen.

En simpel implementering er at omregne vejprognosens oplysninger om den enkelte times relative luftfugtighed og temperatur til absolut luftfugtighed. Dernæst beregnes timens korrektionsfaktor defineret som brøken mellem timens absolutte luftfugtighed ude i forhold til døgnets gennemsnitlige absolutte luftfugtighed ude. I timer med lavt absolut fugtindhold i udeluften vil korrektionsfaktoren have en værdi på under 1, mens den vil være over 1 i timer med høj luftfugtighed.

Korrektionsfaktoren anvendes til at justere det lave setpunkt – uønsket relativ luftfugtighed. I timer med meget tør udeluft (korrektionsfaktor på < 1) sænkes timens setpunkt, hvilket øger luftskiftet. Det modsatte sker for timer med korrektionsfaktorer på over 1. Resultatet for et helt døgn er, at ventilationsanlæggets effektivitet er forøget, målt som bortskaffet gram fugt pr. m³ tilført udeluft.

Ventilationsstyring i særlige situationer

Den beskrevne styring af luftmængder tager afsæt i, at forurening af luft sker inde i boligen alene ved afgivelse af vanddamp fra personer og deres aktiviteter og afgivelser af CO₂ fra personernes almindelige stofskifte, hvor tilført udeluft fortynder forureningen i indeluften.

I tilfælde af at det absolutte vandindhold i udeluften er højere end inde, skal beregningscyklus for fugt ikke gennemføres, da dette blot vil dokumentere, at boligens fugtindhold vil øges og aldrig komme ned på setpunktet. Fortsat gælder dog, at det er mindstekrav til luftskifte.

Styringen anbefales udstyret med mulighed for direkte styring ud fra indtastede værdier. Dette vil være et ressourcebesparende hjælpemiddel ved indregulering og test af det samlede ventilationsanlæg. På denne måde kan det kontrolleres, at samtlige VAV-spjæld modtager styreordre og leverer de faktiske værdier. Fejl i spjæld og rørføring vil hurtigt vise sig, ved at de leverede luftmængder ikke svarer til de bestilte.

Hertil kommer, at det samlede ventilationsanlæggs kapacitet nemt kan testes, ved at man stiller samtlige spjæld til maksimum og ud fra spjældenes respons kontrollerer de faktiske luftmængder og den interne fordeling. Ved samme lejlighed kan man måle anlæggets SEL-faktor, som netop er specificeret for anlæg med fuld kapacitet.

Ved mulighed for at styre de enkelte VAV-spjæld direkte kan anlæg lukkes ned til justering, eller hvis der er stærkt forurenet luft udenfor.

Der er særlige regler for, hvordan ventilationsstyring skal agere i forbindelse med brand. Se indkøbsvejledningens afsnit om brand- og røgsikring (Øien m.fl. 2023).

Styring baseret på flere indeklimasensorer i en lejlighed

Boliger ventileres ud fra princippet om, at der leveres frisk luft ind i de 'tørre' rum, dvs. stue, soveværelse mv., mens afkastluften trækkes fra de 'våde' rum – køkken og badeværelse. Her er hver bolig én ventilationszone.

Hvis der er tvivl om, hvorvidt én indeklimasensor giver et retvisende billede af indeklimaet i *høle* boligen, kan man midlertidigt eller permanent installere supplerende indeklimatemålere. Begrundelsen er, at indeklimaet i en bolig kan variere, selvom fugt og CO₂ spreder sig hurtigt. Det kan især være aktuelt i større lejligheder, lejligheder fordelt på flere etager eller i boliger, hvor der er et ringe luftskifte mellem soveværelse og de øvrige rum. Bemærk, at der er krav i bygningsreglementet om minimumsluftskifte mellem rum med lukkede døre.

Den ovenfor beskrevne styring kan nemt inkludere en eller flere ekstra sensorer. Styringen baseres fortsat på to VAV-spjæld, hvor målingerne fra de enkelte sensorer aggregeres til én værdi for henholdsvis fugt og CO₂.

Hvis afvigelserne er beskedne, foreslås det, at input til styrealgoritmerne blot er et simpelt gennemsnit af seneste måling.

I tilfælde af at et værelse i perioder har en betydeligt højere koncentration af fugt eller CO₂, anbefales det, at den højeste værdi for fugt eller CO₂ benyttes. Det vil give et lidt højere luftskifte, men omvendt sikre, at indeklimaet i alle målepunkter er i orden.

Ovenstående algoritmer beskriver en styring med én indeklimasensor placeret centralt i boligen. For større lejligheder, herunder lejligheder på flere etager, kan det være relevant at installere flere indeklimasensorer.

Litteraturliste

Andersen, R. K. (2013). *Erfaringer fra projekt Dynamisk varmeregnskab*. Center for Indeklima og Energi, Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet.

Andersen, R. K., G. Trotta & L. Gunnarsen (2022). *Evaluering af projekt Dynamisk varmeregnskab: kvantitativ del*. Institut for Miljø og Ressourceteknologi, Danmarks Tekniske Universitet.

Gunnarsen, L., R. K. Andersen & G. Wilke (2021). Better building operation, maintenance, and well-being in apartments with smart indoor climate meters. I: Cao, G., S. B. Holøs, M. K. Kim m.fl. (red.). *Healthy Buildings 2021 – Europe: Proceedings of the 17th International Healthy Buildings Conference 21-23 June 2021* (vol. 9, s. 78-82). Article 2.7 SINTEF Academic Press.

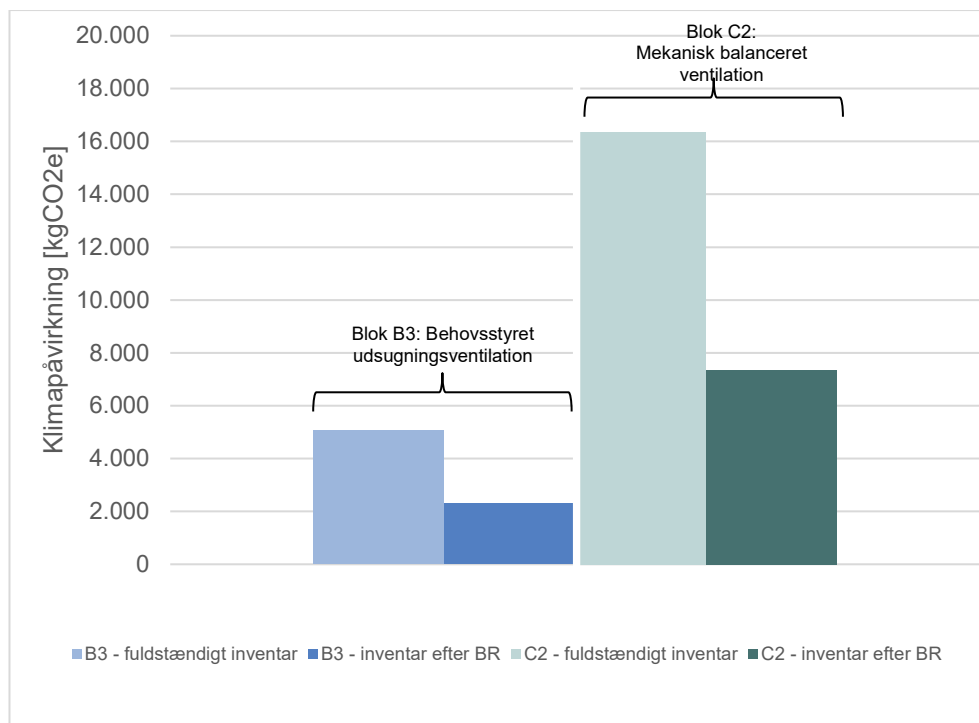
https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/461306859/Better_building_operation_maintenance_and_well_being_in_apartments_with_smart_indoor_climate_meters.pdf (lokaliseret den 13.06.24).

Øien, T. B., G. Wilke, C. F. Sørensen m.fl. (2023). *Indkøbsvejledning for behovstilpasset udsugningsventilation i eksisterende etageboliger*. BUILD-rapport 2023:16. København.

BILAG 2: UDDYBENDE RESULTATER FOR LCA AF HØJSTRUPPARKEN

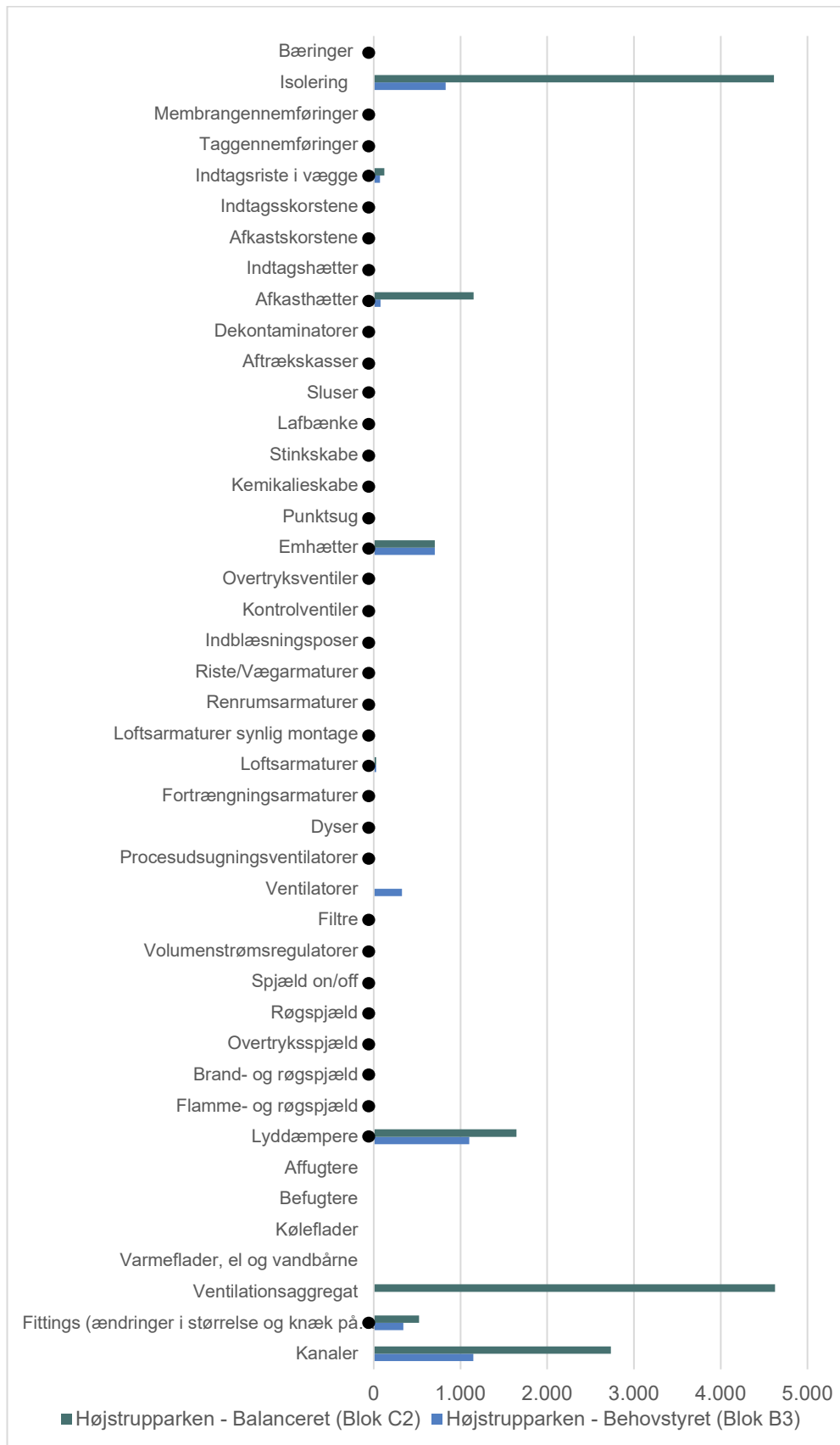
Her vises uddybende informationer om de materialerelaterede dele af klimaberegningen for ventilationsløsninger i Højstrupparken. Forskellen i de materialerelaterede påvirkninger skyldes mest en forskel i mængder, hvor ventilationsanlægget vejer 1.130 kg ved udsugningsventilation og 3.163 kg ved balanceret ventilation.

I rapportens resultater medtages samtlige mængder fra rådgiverens BIM-modeller. Hvis man derimod kun medtog materialer i henhold til den gældende afgrænsning for nybyggeri i BR18, bilag 2, tabel 6, ville påvirkningerne være betydeligt lavere. Se figur 27.



Figur 27. Klimapåvirkning afhængigt af afgrænsning af de inkluderede komponenter. De lyse kolonner viser påvirkninger fra hele inventaret som registreret i modellen sammenlignet med afgrænsningen af inventar efter BR18, bilag 2, tabel 6 i de to mørke kolonner. Beregningen omfatter livscyklusmodulerne A1-3, C3 og C4 med en betragtningsperiode på 50 år og er baseret på generiske miljødata for materialer i henhold til BR18, bilag 2, tabel 7. Enheden er den totale klimapåvirkning for hele systemet og efter 50 år.

Dette illustreres også tydeligt i figur 28, som viser klimapåvirkningen for de enkelte kategorier af byggevarer. Her har komponenter som lydæmpere, emhætter, afkasthætter, volumenstrømsregulatorer mv. en relevant klimapåvirkning, men ligger uden for den nuværende afgrænsning i bygningsreglementets klimakrav for nye bygninger.



Figur 28. Klimapåvirkning af de enkelte komponenter, der er med i rådgivermodellerne. Enheden er den totale klimapåvirkning for hele systemet efter 50 år. Den sorte prik markerer komponenter uden for bygningsreglementets afgrænsning i BR18, bilag 2, tabel 6. Beregningen omfatter livscyklusmodulerne for materialer A1-3, C3 og C4 med en betragtningsperiode på 50 år og er baseret på generiske miljødata for materialer fra BR18, bilag 2, tabel 7.

Behovsstyret ventilation i ældre etageboliger

I eksisterende etagebyggerier af ældre dato, er løbende udelufttilførsel ved naturlig eller mekanisk ventilation afgørende for at opretholde et godt indeklima. Dette løses i moderne renoveringer oftest med balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding, af hensyn til både energikrav og indeklima. I kraft af den teknologiske udvikling, vokser der alternativer frem inden for ventilationsteknologien. Disse alternativer søger at løse generelle eller mere kontekstspecifikke behov og ønsker i forbindelse med ventilation i boliger.

Behovsstyret udsugningsventilation er en ventilationsløsning der er opstået som svar på en række specifikke udfordringer vedrørende renovering af eksisterende etagebyggerier.

Landsbyggefonden har i samarbejde med en række almene boligafdelinger igangsat demonstrationsprojekter med henblik på at afprøve, opsamle erfaringer og videreudvikle denne form for ventilation. I denne rapport deles de første erfaringer fra demonstrationsprojekterne.