

Luftudveksling mellem bolig og tagrum

PFT-målinger i 30 huse

Hansen, Tessa Kvist; Peuhkuri, Ruut Hannele

Creative Commons License
Ikke-specificeret

Publication date:
2020

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Hansen, T. K., & Peuhkuri, R. H. (2020). *Luftudveksling mellem bolig og tagrum: PFT-målinger i 30 huse*. Polyteknisk Boghandel og Forlag. BUILD Rapport Nr. 2020:19

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 -

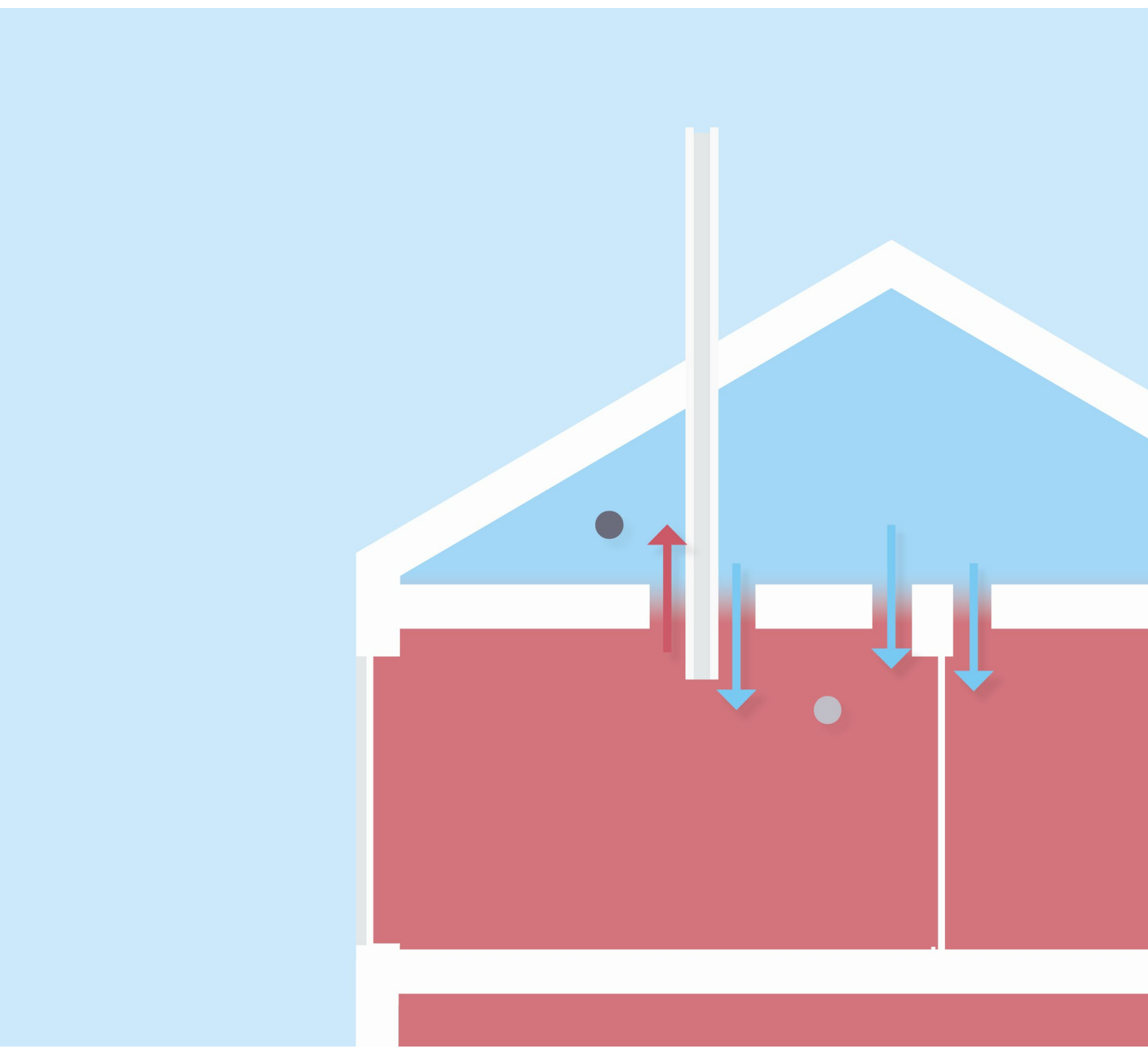
Take down policy

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 2020:19

Luftudveksling mellem bolig og tagrum

PFT-målinger i 30 huse



LUFTUDVEKSLING MELLEM BOLIG OG TAGRUM

PFT-målinger i 30 huse

Tessa Kvist Hansen
Ruut Peuhkuri

BUILD Rapport 2020:19
Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet København
2020

TITEL	Luftudveksling mellem bolig og tagrum
UNDERTITEL	PFT-målinger i 30 huse
SERIETITEL	BUILD Rapport 2020:19
UDGIVELSEÅR	2020
UDGIVET DIGITALT	Juli 2020
FORFATTER	Tessa Kvist Hansen og Ruut Peuhkuri
FAGFÆLLEBEDØMMER	Carsten Rode
REDAKTION	Dorte Gram
SPROG	Dansk
SIDETAL	82
LITTERATURHENVISNINGER	Side 58-60
EMNEORD	Indeklima, luftkvalitet, etageadskillelse, skimmelsvampe, ventilation
ISBN	978-87-93585-25-6
TEGNINGER	Figur: 3,4,5,6,7,9,12 Claus Nielsen. Øvrige se billedtekst.
FOTO	Se billedtekster
OMSLAGSILLUSTRATION	Michael Ulf Bech
UDGIVER	Polyteknisk Boghandel og Forlag ApS Anker Engelunds Vej 1 2800 Kongens Lyngby
	Udgivet i samarbejde med Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet København
	Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven.



FAGFÆLLE-
BEDØMT

INDHOLD

FORORD	4
1 SAMMENFATNING	6
2 INDLEDNING	8
2.1 Luftudveksling mellem bolig og tagrum	8
2.2 Formål og hypoteser	9
2.3 Projektets aktiviteter	9
3 BAGGRUND	12
3.1 Luftstrømme i tagrum	12
3.2 Udveksling med underliggende rum	16
3.3 Tæthed af loft	19
3.4 Fugtkapacitet af isolering	20
4 METODE	22
4.1 Udvalgelse af huse	22
4.2 PFT-metoden	25
4.3 Måling af temperatur og relativ fugtighed	28
5 RESULTATER	32
5.1 PFT-målinger	32
5.2 Temperatur- og fugtmålinger	41
6 DISKUSSION	50
6.1 Luftskefter i boliger og i tagrum	50
6.2 Retning af luftstrøm	51
6.3 Betydning af membraner	52
6.4 Betydning af fugttilførsel fra indeklimaet	52
6.5 Skimmeleksporer	53
6.6 Diskussion i forhold til hypoteser	54
7 KONKLUSION	56
8 REFERENCER	58
9 BILAG	62
9.1 Placering af udstyr i de 30 huse	62
9.2 Absolut fugtindhold i tagrum i forhold til opadgående luftoverføring	78
9.3 Udveksling som funktion af luftskefter	80
9.4 Fugttilskud som funktion af luftskefter	82

FORORD

Den nærværende rapport formidler resultaterne fra forskningsprojektet: Luftudveksling mellem bolig og tagrum, PFT-målinger i 30 huse. Projektet blev gennemført takket være finansiering fra Realdania og Kern-Jespersen Fonden.

Rapporten er en vigtig brik i vores forståelse af de elementer, der spiller en rolle for henholdsvis holdbare og robuste bygningskonstruktioner og det gode og sunde indeklima. Projektet indgår sammen med andre aktuelle projekter, som bl.a. 'Behov for damspærre i lofter' og 'Levetidsanalyse af polyethylenmembraner anvendt i klimaskærmen' til denne forståelse. Den nærværende undersøgelse fokuserer udelukkende på tætheden af loftet mellem beboelsesrum og det uudnyttede tagrum. Der er to afgørende grunde til at tætheden er vigtig. Et tæt loft forhindrer, at fugtig luft fra indeklimaet trænger op og opfugter tagrummet, samtidig forhindrer det, at sporer fra eventuel skimmelsvampevækst overføres fra tagrummet til den underliggende bolig med forringet indeklima til følge. Men hvor tætte er normale lofter? – Og hvis de ikke er tætte – hvor stor er transporten af fugt fra bolig til tagrum og omvendt så? Og hvad skyldes fugten i tagrummet?

Den omfattende feltundersøgelse blev muliggjort ved, at en række parcelhusejere tillod adgang til deres boliger og tagrum. Vi takker husejerne for dette vigtige bidrag. Ligeledes takker vi kollegaer for assistance, især seniorforsker Eva B. Møller for at tage initiativ til projektet og for varetagelsen af den indledende koordinering. Vi retter også en tak til fuldmægtig Haseeb Wahedi for bidrag i forbindelse med feltundersøgelsen og dataindsamlingen samt seniorforsker Niels Christian Bergsøe for gennemførelse af PFT-målingerne samt beskrivelse af metoden.

Rapporten er inden publicering blevet fagfællebedømt af professor Carsten Rode fra Danmarks Tekniske Universitet, hvem BUILD takker for det konstruktive samarbejde.

Vi håber, at rapporten kan være med til bringe både forskningen og byggebranchen tættere på løsninger, der sikrer gode og sunde boliger.

Institut for Byggeri, By og Miljø, BUILD, Aalborg Universitet
Sektion for Byggeteknik og Proces
Juli 2020

Ruut Peuhkuri
Forskningschef

The background of the page is decorated with a pattern of thin, dark blue wavy lines that flow across the entire surface. In the upper center, there is a solid dark blue circle containing the white number '1'.

1

SAMMENFATNING

1 SAMMENFATNING

Denne rapport beskriver resultaterne fra forskningsprojektet: Luftudveksling mellem bolig og tagrum. I projektet blev det undersøgt, i hvilket omfang der sker udveksling af luft mellem bolig og uudnyttede tagrum. Målet var på sigt at kunne vurdere, hvilken betydning mulig skimmelsvamp i et tagrum har for eksponeringen i den underliggende bolig samt at kunne vurdere fugtoverførslen fra boligen til uopvarmede tagrum.

Luftudvekslingen mellem boliger og udnyttede uopvarmede tagrum blev undersøgt ved en passiv sporgasmetode. Metoden blev anvendt ved placering af to typer sporgasser i hver sin zone, hhv. bolig og tagrum. På baggrund af målte koncentrationsniveauer i de respektive zoner, samt beregnede emissionsrater baseret på temperaturmålinger, kunne udvekslingen mellem zonerne bestemmes, foruden luftskifterne i de to zoner. Der indgik 30 huse i undersøgelsen, og målingerne blev foretaget i to perioder for hvert hus; hhv. en kold og en varm periode. De 30 huse fordelte sig på byggeår fra 1920'erne til 2010'erne, et enkelt hus var dog fra 1719. Der var 19 huse med dampspærre i loftet og 11 huse uden. Derudover blev to typer af tagkonstruktioner undersøgt, men fordelingen var ikke ligelig (25-5). Det samme gælder huse med/uden mekanisk ventilation (6-24) og fordelingen mellem huse med mineraluld og cellulosebaseret loftisolering (27-3). Alle husene var placeret på Sjælland. Der blev desuden målt temperatur og relativ fugtighed i både boliger og tagrum samt målt udeklima.

Undersøgelsen viste, at der forekom luftudveksling mellem bolig og uudnyttet, uopvarmet tagrum i begge retninger i både varme og kolde perioder. Dette gjorde sig gældende uanset, om der var en dampspærre eller ej. Som gennemsnitsbetragtning blev det fundet, at den opadgående luftoverføring var større end den nedadgående luftoverføring.

På baggrund af de målte resultater, kunne der ikke konstateres en sammenhæng mellem udeluftskifte i tagrummet og absolut fugtindhold. Der kunne dog etableres en sammenhæng mellem den opadgående luftoverføring og fugttilskuddet fra boligen til tagrummet – jo højere opadrettet luftoverføring des mindre fugttilskud, dvs. forskel mellem fugtindhold i tagrummet i forhold til fugtindhold i boligen.

Luftskifterne i boligerne blev målt til relativt lave værdier i forhold til bygningsreglementets krav om grundluftskifte på 0,30 l/s pr. m² opvarmet etageareal, hvilket tilnærmelsesvis svarer til 0,5h⁻¹. Ingen af de undersøgte boliger levede op til kravet i vinterperioden, og kun fire boliger levede op til kravet i sommerperioden. Målingerne af luftskifterne i tagrummene viste en stor variation. Der blev konstateret synlig skimmel i tagrummene i tre af de undersøgte huse. Alle disse tagrum blev målt til at have relativt lave luftskifter i tagrummene.



2

INDLEDNING

2 INDLEDNING

2.1 Luftudveksling mellem bolig og tagrum

Der findes mange forskellige tagtyper og -udformninger i Danmark, men overordnet kan der skelnes mellem ventilerede og ikke ventilerede tage (Brandt, Bunch-Nielsen, & Morelli, 2019). Tagkonstruktioner i boliger og især i én-familiehuse og rækkehuse er ofte med ubenyttede, ventilerede, kolde tagrum. Disse typer tage kaldes også kolde tage, da den bærende del af tagkonstruktionen ligger primært på den kolde side af varmeisoleringen.

Ventilationen i disse uopvarmede og uudnyttede tagrum er essentiel i forhold til bortventilering af fugt. Fugten i disse tagrum kan stamme fra udeluften i fugtige perioder, men også fra den underliggende bolig gennem utætheder. Luften i boliger indeholder en højere koncentration af fugt end udeluften, da menneskelig tilstedeværelse og hverdagsaktiviteter (herunder madlavning, tøjvask, og -tørring, personlig hygiejne m.m.) frigiver vanddamp til luften. Derved øges koncentrationen af vanddamp i indeluften. Kondensproblemer i uopvarmede, uudnyttede tagrum kan derfor potentielt skyldes en kombination af, at etageadskillelse mellem bolig og tagrum ikke er tilstrækkelig tæt, og at udeluftskiftet af tagrummet er for ringe. Den fugtige luft fra boligen kan således enten diffundere igennem materialerne i etageadskillelsen (diffusion), eller finde vej gennem utætheder og revner ved konvektion. Konvektion har imidlertid vist sig at være den største årsag, når det kommer til denne fugttransport (Hansen & Møller, 2016b, 2017). Såfremt ventilationen i tagrummet ikke er tilstrækkelig til at bortventilere denne fugtbelastning, kan der opstå fugtproblemer i tagrummet. Et forhøjet fugtniveau er u hensigtsmæssigt og kan således bl.a. føre til både skimmel- og svampevækst.

Et materiales fugtkapacitet er et udtryk for materialets evne til at optage og afgive fugt, når den relative fugtighed af den omgivende luft stiger eller falder. Der findes kun begrænset viden om, hvorvidt materialernes fugtkapacitet – fugtbuffer evnen – i tagrum spiller en rolle i udjævning af fugtbelastningen i et tagrum. Det er dog påvist, at betydningen af denne fugtbuffer evne falder kraftigt for stigende luftskifte (Rode & Peuhkuri, 2006).

Vidensgrundlaget for, hvorvidt skimmelsvampevækst i tagrum påvirker indeklimaet og gør, at beboere bliver udsat for skimmeleksposering i boligen nedunder, er desværre meget begrænset. I praksis er skimmelvækst på den kolde side af klimaskærmen kun blevet opfattet som et lokalt problem, der kun påvirkede forholdene i loftsrummet, især hvis der er tale om en lufttæt konstruktion, fx med en dampspærre. Imidlertid skaber det utryghed hos beboere, når der konstateres skimmelvækst fx i et ubeboet tagrum over boligen, da man ikke ved, om det kan påvirke indeklimaet eller ej. Undersøgelserne omkring luftudveksling mellem tagrum og bolig har hidtil været begrænset. Derimod findes der undersøgelser, som har vist, at forekomsten af skimmel i et ventileret hulrum *under* en bolig, fx krybekælder, kan betyde, at beboerne i boligen ovenover udsættes for skimmeleksposering. Dette skyldes lufttransport fra krybekælder til boligen pga. trykforskel og termisk opdrift (Airaksinen, Pasanen, Kurnitski, & Seppänen, 2004). Denne lufttransport er afhængig af vejret, sæson og brugen og ventilation af boligen.

Om skimmel i et ubeboet tagrum kan trænge gennem loftet og således påvirke brugere af rummet under tagrummet, har stor betydning for omkostningerne til at udbedre efter en skimmelsvampeskade. Hvis skimmeleksposeringen er ubetydelig, vil en udbedring kunne reduceres til afhjælpning af årsagen til skimmelvæksten, hvorefter skimlen med tiden vil

tørre ud. Hvorvidt der sker en eksponering af brugerne under et tagrum med skimmelsvamp er uvist, og der kan derfor være tvivl om skimmelsvampe rent fysisk skal fjernes. Sundhedsstyrelsen har beskrevet, hvorledes mennesker i forbindelse med renovering for skimmelsvampe kan blive eksponeret for partikler og sporer fra tørre skimmelsvampe, og at dette kan påvirke helbredet (Sundhedsstyrelsen, 2005).

2.2 Formål og hypoteser

Formålet med projektet var at undersøge, i hvilket omfang der sker en luftudveksling mellem bolig og uudnyttede tagrum, for på sigt at kunne vurdere, hvorvidt beboerne i boligen nedeunder eksponeres ved skimmelsvamp i tagrum, samt at kunne vurdere fugtoverførslen fra boligen til uopvarmede tagrum. Resultaterne fra dette projekt kan derfor bidrage til at afklare, hvorvidt og under hvilke forhold der forekommer luftudveksling mellem bolig og tagrum, samt i hvilket omfang og om retningen er årstidsbestemt. En signifikant luftoverføring fra tagrum til bolig, vil kunne bruges i en risikovurdering af beboeres eksponering ved skimmel i tagrummet. Resultaterne kan ligeledes være med til at kortlægge, hvorvidt eventuelle skimmelproblemer i tagrummet skyldes fugt overført fra boligen. Følgende hypoteser undersøges i nærværende projekt;

- Der sker en lufttransport gennem en loftskonstruktion, og transporten kan gå såvel op som ned, afhængig af årstid.
- Opadrettet lufttransport betyder øget fugttilførsel i tagrum.
- Hygroskopiske egenskaber af materialer i tagrummet har betydning for fugtforholdene i luften i tagrummet.

Luftudvekslingen undersøges vha. PFT-metoden, som er en passiv sporgasteknik til måling af gennemsnitlige ventilationsforhold over en periode. Metoden giver mulighed for samtidig anvendelse af flere gasarter og dermed undersøgelse af luftudveksling mellem flere zoner. Fugtforholdene i tagrummene undersøges og monitoreres med dataloggere, som måler temperatur og relativ luftfugtighed.

2.3 Projektets aktiviteter

Overordnet omfatter projektet følgende aktiviteter:

- Rekruttering af 30 huse til målinger.
- Udførelse af PFT-målinger i alle 30 huse i 2 perioder, hhv. vinter og sommer.
- Udførelse af supplerende temperatur- og relativ fugtighedsmålinger.
- Analyse og formidling af projektets resultater.

Denne rapport præsenterer resultater fra PFT-målinger samt temperatur- og relativ fugtighedsmålinger i både boliger og tagrum.



3

BAGGRUND

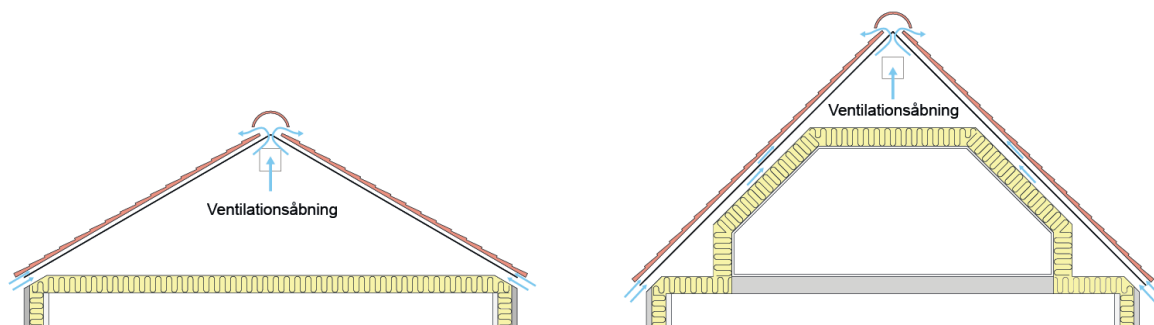
3 BAGGRUND

3.1 Luftstrømme i tagrum

Tagkonstruktionen med hældning og ventileret tagrum (figur 1) har traditionelt været en simpel og fugtsikker måde at bygge både mindre og større bygninger på: Tagfladen har ledt nedbør væk fra bygningen og det ventilerede tagrum har sikret fjernelsen af den fugt, der måtte komme ind i tagrummet, primært fra indeluften. Den bærende konstruktion er oftest lavet af træ og ved for høje fugtforhold i tagrummet, kan der opstå skimmelvækst på de organiske overflader. I værste fald vil træet nedbrydes på sigt (Ojanen et al., 2010).

Denne type tagkonstruktion blev især brugt i småhuse i 1950'erne, 1960'erne og 1970'erne. Konstruktionen er dog også blevet brugt såvel tidligere som den dag i dag. Tætheden af loftkonstruktionen var tidligere sikret med pudsede lofter, men siden 1960'erne er der i stigende grad blevet brugt en dampspærre til at sikre tætheden af disse typer konstruktioner (Hansen, Møller og Tvedebrink 2019). Det er dog først i de senere år, at byggebranchen har forstået betydningen af tætte samlinger samt gennemføringer for den samlede tæthed af dampspærren, hvorfor tætheden af dampspærren i ældre huse må formodes at være mangelfuld.

Ventilation – som er brugt som synonym for udeluftskiftet i denne rapport – er derfor nødvendig i denne type tagrum, for at bortventilere den mængde fugt, som måtte trænge igennem en etageadskillelse. Ved utilstrækkelig ventilation kan der forekomme fugtophobning, som kan være skadelig for tagkonstruktionen (fx skimmel- eller svampevækst). Den naturlige ventilation af disse tagrum sker gennem åbninger, som etableres ved hhv. tagfod, kip, gavle, tagvinduer mv (Brandt et al., 2019). Ventilationen drives af forskelle i luft- og vindtryk, og den termiske opdrift udnyttes ved at have ventilationsåbninger ved kip. Luften strømmer således igennem disse åbninger og ventilerer fugten bort (Brandt et al., 2009). I dette projekt indgår der to tagrumstyper, der dog begge ventileres naturligt ved tagfod og kip og i nogle tilfælde også ved gavle eller tagvinduer. Ventilationsprincipperne illustreres på figur 1. Disse tage er defineret som kolde tage, da den bærende del af tagkonstruktionen befinder sig over og dermed uden for loftsisoleringen. Taget er derfor udsat for lave temperaturer om vinteren.

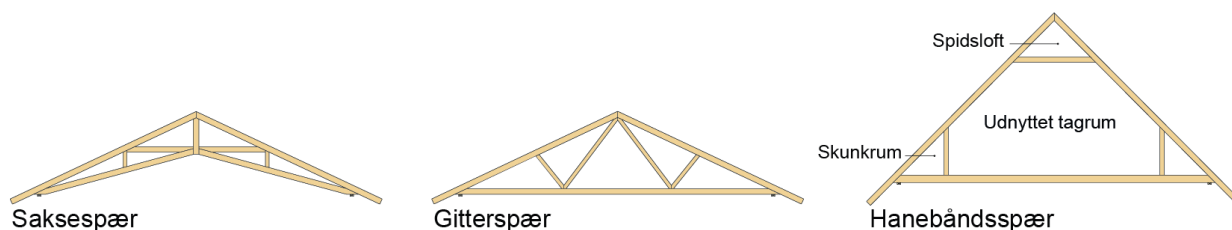


FIGUR 1. Luftstrømme i åbne tagrum og hanebåndslofter. Ventilationsåbning (udluftningsåbning) i gavle kan supplere ventilationen i korte bygninger SBI-anvisning 273: *Tage; Materialer, egenskaber, detaljer*. (Brandt et al., 2019).

Foruden den tilsigtede ventilation ved udluftning i tagrummene, som beskrevet ovenfor, forekommer konvektion ved utætheder. Den termiske opdrift i boligens indeklima gør, at der naturligt vil være et lille overtryk på undersiden af loftet, og dette overtryk gør, at der især om vinteren, hvor der forekommer størst temperatur- og trykforskel mellem inde og ude, trænger fugtig luft op i tagkonstruktionen. Denne transport forekommer især gennem utætheder (fx loflemme og gennemføringer). Vindtryk kan desuden bidrage til både over- og undertryk på tage, og i tilfælde med undertryk vil den opadgående fugtvandring fra indeklimaet øges.

3.1.1 Typer af tagrum

Nærværende projekt omhandler uudnyttede tagrum illustreret på figur 1. På figur 2 illustreres typiske spærkonstruktioner for tagrum inkluderet i dette projekt. Da den bærende del af konstruktionen befinder sig over isoleringen, vil en del af tagkonstruktionen blive udsat for lave temperaturer om vinteren eller om natten. Det medfører risiko for kondensdannelse, hvis fugtig rumluft når disse kolde overflader (Brandt et al., 2009).

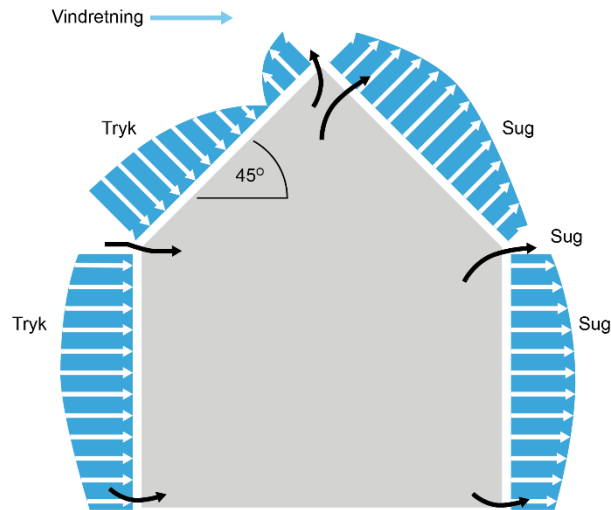


FIGUR 2. Spærkonstruktioner med udeluftventilerede tagrum. Øverst c) og d) sadeltage, og nederst f) eksempel på spærtype med udnyttet tagetage, men ventilerede tagrum (spidsloft og skunkrum) *SBI-anvisning 273: Tage; Materialer, egenskaber, detaljer*. (Brandt et al., 2019).

De betragtede tagrumstyper adskiller sig således primært fra hinanden ved, at der er forskellige forhold mellem luftvolumen i tagrummet og loftsarealet: Typer med vandret loftisoleering (venstre figur 1) har et større forhold mellem luftsvolumen og loftsareale end typer med hanebåndsløft og skunkrum (højre figur 1). Derudover betyder det mere komplicerede geometri (højre figur 1), at ventilationen kan variere en del i de forskellige dele af tagrummet.

3.1.2 Luftstrømme udefra

Vindtryk på tagflader skaber både over- og undertryk i tagrummet, som har betydning for luftbevægelserne og dermed også for fugttransport. Når vinden rammer en bygning, vil der på vindsiden skabes overtryk, og undertryk på læsiden, som illustreret på figur 3. Dette gælder både på facader og tag-overflader. På flade tage er der dog som regel et lille, konstant undertryk, mens der for større taghældninger skabes tryk på vindsiden, og sug på læsiden. Ved moderate taghældninger vil der også komme undertryk på vindsiden af hældningstage, hvilket betyder, at det ofte er undertrykkene, der dominerer hen over tagene. Dermed kan luft presses både ind og ud af sprækker og utætheder i bygningen, herunder det ventilerede tagrum. Dette er især tilfældet ved store vindbelastninger.



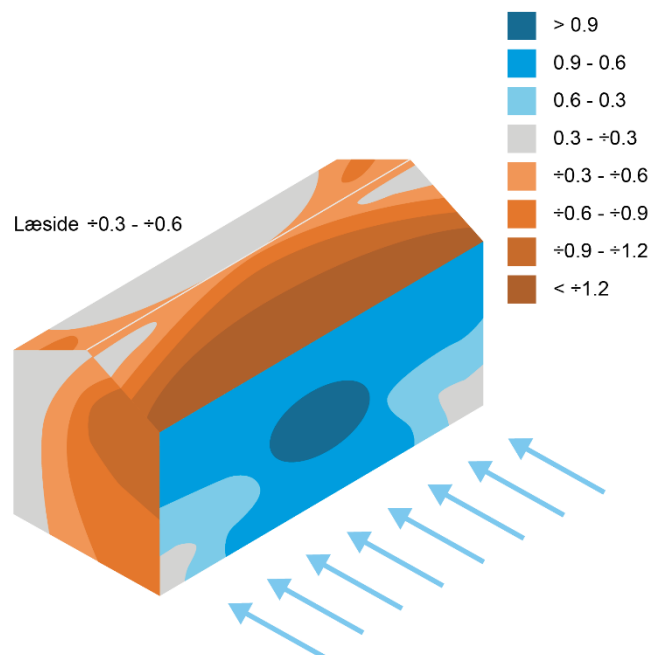
FIGUR 3. En principtegning af vindtryksfordelingen omkring en bygning.

I forhold til fugttransport kan undertryk på ydersiden af bygningen medføre udadgående luftstrøm, hvorved fugtig indeluft drives ud mod den kolde del af konstruktionen. Herved opstår der risiko for kondensdannelse. Udeluften kan altså tilføre fugt til de kolde tagkonstruktioner i perioder, hvor konstruktionen er koldere end udeluftens dugpunkt, men denne fugt bortventileres normalt igen, når udeluftens fugtighed igen er mindre end fugtigheden i tagrummet (Brandt et al., 2009).

Trykbelastning på en bygning under givne vindforhold kan bestemmes vha. Bernoullis princip om at summen af dynamisk, hydrostatisk og statisk (atmosfærisk) tryk er konstant. Dermed vil belastningerne på bygningen kunne beregnes ved følgende ligning (01), hvor $p_{a,y}$ udgør det samlede tryk, bygningen udsættes for [Pa], $p_{a,o}$ definerer summen af det atmosfæriske og hydrostatiske tryk [Pa]. Det dynamiske tryk, altså vindtrykket, defineres af den lokale vindhastighed (v_{loc} [m/s]) i højden H [m], $\rho_{a,y}$ er luftens densitet [kg/m^3], og C_p [-] er en pre-defineret lokal vindtrykskoefficient, som tager højde for, at kun en del af det dynamiske tryk afsættes på bygningen.

$$p_{a,y} = p_{a,o} + C_p \cdot \frac{\rho_{a,y} \cdot v_{loc}^2(H)}{2} \quad (01)$$

Grundet vindens naturlige bevægelser omkring bygninger, defineres C_p -koefficienten af placeringen på bygningen, der betragtes, og kan således både fremstå med positivt og negativt fortegn. I den forbindelse vil en negativ C_p -værdi angive undertryk, som på læsiden, og en positiv C_p er således et udtryk for det overtryk, der typisk forekommer på vindsiden. Figur 4 illustrerer eksempler på C_p -koefficienten, men disse værdier varierer en del både med hensyn til geometri, og hvordan vindretningen rammer bygningen og er dermed yderst dynamiske.



FIGUR 4. Eksempler på værdier for Cp-koefficienten givet for en bygning. Reproduceret efter (Bjerregaard & Nielsen, 1981).

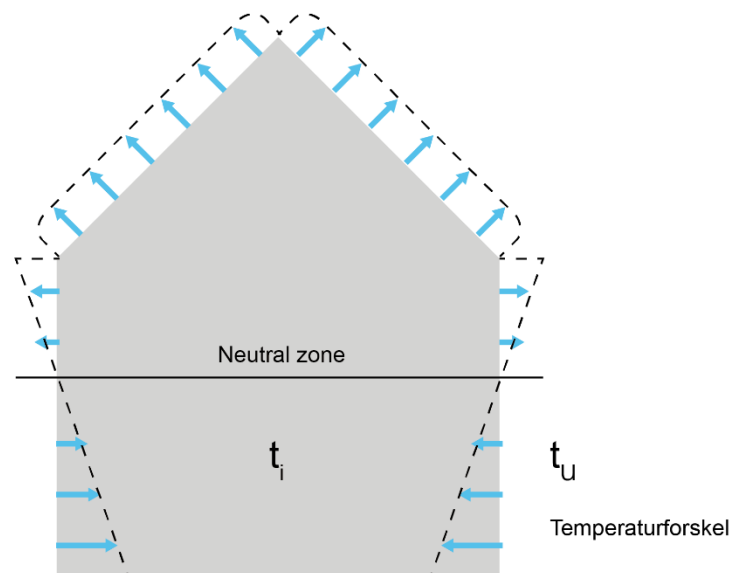
3.1.3 Luftudveksling hen over året

Da densiteten af luft falder ved stigende temperatur, og varm luft dermed er lettere end kold luft, vil varm luft stige til vejrs. Under normale vinterforhold vil der derfor oftest være undertryk i den nederste del af en bygning og overtryk i den øverste del. Skellet mellem zonen med overtryk, og zonen med undertryk, kaldes den neutrale zone (se Figur 5). Fordelingen og trykforskellen afgøres af temperaturforskellen og af bygningshøjden og fordelingen af åbninger og utætheder.

Trykforskellen mellem zoner kan beregnes ved nedenstående formel, hvor ρ_i angiver luftens densitet inde og ρ_u ude (temperatur afhængig), g er tyngdeaccelerationen ($9,81 \text{ m/s}^2$), og h angiver højden (Brandt et al., 2009).

$$\Delta p_\theta(h) = \rho_i \cdot g \cdot h - \rho_u \cdot g \cdot h \quad (02)$$

Da temperaturforskellen antages at være størst i vinterperioden, vil trykforskellen dermed også være størst om vinteren. Det anses derfor sandsynligt, at den overvejende luftstrøm i en opvarmet bygning er opadgående i kolde perioder. I varme perioder kan temperaturen i loftsrummet ofte overstige temperaturen i indeklimaet, og dermed kan lufttrykket i tagrummet overstige indeklimaets lufttryk. Det betyder, at den nedadgående luftstrøm kan dominere.



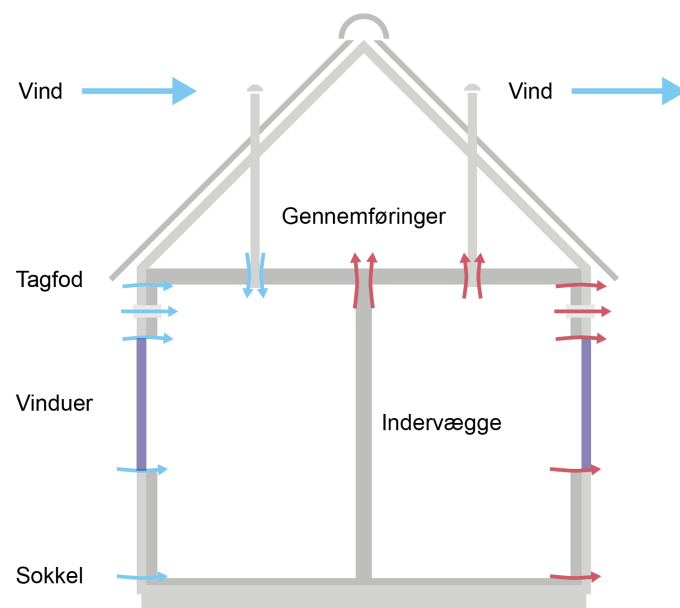
FIGUR 5. Angivelse af neutral zone, og fordeling af hhv. over- og undertryk i en standard bygning i en vinterperiode. Benævnelserne t_i og t_u angiver indetemperatur hhv. udetemperatur. Reproduceret efter (Noreng, 1995).

Igennem en undersøgelse af luftskifter og migration af VOC'er (flygtige organiske forbindelser) mellem uopvarmet kælder og bolig har et studie fra Michigan, USA (Du, Batterman, Godwin, Rowe, & Chin, 2015), påvist en tydelig sæsonafhængig variation i luftudvekslingen igennem etageadskillelsen. Her fandt forskerne, at den opadgående luftoverførsel fra kælderen til boligen var størst om vinteren.

3.2 Udveksling med underliggende rum

Luftudvekslingen mellem tagrum og bolig foregår ved konvektion, primært ved utætheder, revner og sprækker, men også gennem permeable materialer. Konvektion er strømning i gas eller væske, som i dette tilfælde er luft.

På figur 6 fremgår vindens påvirkning af luftbevægelser igennem utætheder i en bygning. Det fremgår, at kold luft (blå pile) trænger igennem utætheder og åbninger i vindsiden og kan skabe træk. Der kan opstå trykforhold i tagrummet, hvormed kold luft drives nedad gennem utætheder i loftskonstruktionen. Samtidig kan eventuelle urenheder (fx partikler og sporer fra tørre skimmelsvampe) fra tagrummet transporteres ned til beboelsesrum. Ydermere fremgår det, at varm luft (røde pile) drives ud af utætheder i både facade og loft, med risiko for fugtskader, herunder med risiko for skimmelvækst, når denne varme fugtige luft møder koldere konstruktionsdele, fx i tagrummet. Utilsigtet transport af varm luft ud igennem klimaskærmen betyder også forøget varmetab, da erstatningsluften skal opvarmes. Det er netop disse problematikker, der gør det relevant at kende omfanget og retningen af luftudveksling mellem beboelsesrum og tagrum.



FIGUR 6. Luftstrømning gennem en bygning ved vindpåvirkning.

Luftbevægelser i en bygning kan også forekomme ved termiske kræfter. Således kommer skorstenseffekten ind i billedet, se også figur 5. Da varm luft er lettere end kold luft, vil denne stige til vejrs og skabe et undertryk i nederste del af bygningen, som derved trækker udeluft ind igennem utætheder i konstruktionen (infiltration). Der vil dannes overtryk i øverste del af bygningen, og den varme luft drives ud igennem utætheder (exfiltration). Dette er illustreret i figur 7.



FIGUR 7. Luftbevægelser mellem etager.

3.2.1 Luft nedefra og op

Som beskrevet ovenfor, kan den opadgående luftoverføring fra bolig til tagrum være betinget af både tryk- og temperaturforskelle. Konsekvenserne af den opadgående luftoverføring er således både utilsigtet varmetab fra boligen, samt fugttilskud til tagrummet. Energistyrelsen anbefaler efterisolering af loft, såfremt der er under 250 mm isolering i den eksisterende konstruktion (Energistyrelsen, n.d.). Denne isolering må dog ikke forhindre eller reducere ventilationen af tagrummet, som stadig skal opfylde gældende retningslinjer. Ved efterisolering er det særligt vigtigt at sørge for loftets lufttæthed for at undgå konvektion af varm, fugtig luft til tagrummet. Dette kan enten sikres ved etablering af ny dampspærre, eller ved at der findes eller genetableres intakt pudset loft (Brandt et al., 2019). Således reduceres varmetabet ikke kun ved øget isolering af loftet, men også gennem reduktion af bidraget til varmetab ved konvektion, når lufttætheden også bliver forbedret. Ved at forhindre konvektion,

vil fugtbidraget fra boligen til tagrummet kunne minimeres. Ved konvektion gennem utætheder i loftets tæthedsplan, er der risiko for, at den fugtige luft fra indeklimaet kondenserer på de kolde overflader i tagrummet. Undersiden af taget er ofte en meget kold overflade, da det udsættes for køling i forbindelse med udstråling til himmelrummet. Hvis temperaturen af tagfladens underside er under luftens dugpunkt, opstår der kondens på overfladen. Hvis denne ikke kan bortventileres, øges risikoen for skimmelvækst og råd.

Der findes kun sparsom dokumentation fra undersøgelser, hvor man har set på egentlig luftudveksling mellem beboelse og tagrum. Derimod findes der en række undersøgelser, hvor luftudvekslingen gennem etageadskillelser mellem kældre/krybekældre og beboelse er blevet studeret. Denne luftudveksling bliver drevet af samme kræfter som luftudveksling mellem tagrum og bolig og er derfor relevant at se på.

Fx har en undersøgelse vedr. luftskifter og migration af VOC'er (flygtige organiske stoffer) mellem uudnyttede, uopvarmede kældre og boliger (Du et al., 2015) påvist høj korrelation mellem koncentrationer af VOC'er i kælderrum og i bolig. Dette tilskrives både utilstrækkelig tæthed af etageadskillelser samt skorstenseffekten. Ligeledes har et dansk studie (Møller & Gunnarsen, 2012) påvist betydelig nettotransport af luft gennem etagedæk mellem aflukket krybekælder og bolig med lav eller ingen ventilation. Et lignende studie fra Finland, har også påvist migration af sporer fra nogle typer skimmelsvampe igennem etagedækket mellem krybekælder og bolig, da der var undertryk i boligen i forhold til krybekælderen (Airaksinen et al., 2004). Et amerikansk studie har undersøgt indtrængen af fine partikler igennem spalter, ved forskellige trykforhold (Mosley et al., 2001). Effekten af trykforskellen fremgår tydeligt heraf. I undersøgelsen målttes koncentrationer af partikler med forskellige størrelser ved forskellige trykforhold. Opstillingen bestod af to kamre med spalter imellem, hvori der i det ene blev genereret partikler. Ved 2 Pa trykforskel, trængte kun 2 % og 0,1 % af partikler med størrelser på hhv. 2 µm og 5 µm igennem spalten. Ved større trykforskel, 20 Pa, kunne 90 % af 2 µm partiklerne trænge igennem spalten. Dette understreger vigtigheden i at opretholde det lufttætte plan.

Betydningen af bl.a. ventilation og utætheder i loftets tæthedsplan for fugtforhold i små skunkrum er for nyligt blevet undersøgt i et dansk studie, og resultaterne viste især vigtigheden af et lufttæt loft, da ventilationen ikke altid kunne fjerne fugten (Feldt Jensen et al., 2019). Et svensk studie påviser øget fugtsikkerhed i kolde tagrum, hvis følgende forhold er gældende; lufttæt loft, et velventileret indeklima i boligen, samt hvis der kan opretholdes et overtryk i tagrummet, sammenlignet med boligen (Hagentoft & Kalagasidis, 2014).

Ud over transport af fugtig luft ved konvektion gennem utætheder i loftet, sker der også diffusion af vanddamp gennem loftskonstruktionen, især hvis der ikke er dampspærre, eller denne ikke har tætte samlinger. Diffusion er bevægelse af molekyler, i dette tilfælde luftens forskellige molekyler, der diffunderer fra høj koncentration mod lav koncentration for at udligne koncentrationerne og skabe ligevægt.

Atmosfærisk luft vil altid indeholde en mængde vanddamp. Vanddampmolekylerne bevæger sig frit i luften og har tendens til at fordele sig jævnt. Når koncentrationen af vanddamp er større i boligens indeluft grundet menneskelig tilstedeværelse, vil koncentrationen af vanddampmolekyler i boligen være højere end udendørs og højere end i tagrummet. Det får vanddampmolekylerne til at diffundere igennem konstruktionsdele, herunder også loftet, for dermed at udligne forskellen i koncentrationen af vanddampmolekyler. Diffusion drives således af denne forskel i koncentrationen af vanddampmolekyler.

3.2.2 Luft oppefra og ned

For opvarmede bygninger i kolde klimaer gælder generelt at der i bunden af en bygning, vil det indendørs lufttryk oftest være lavere end det udendørs lufttryk i samme højde, hvorfor her vil forekomme infiltration. Ligeledes vil de højtliggende rum i en bygning oftest have højere lufttryk end udendørs, i samme højde, og her vil forekomme exfiltration. Det er påvist, at

der næsten altid er undertryk i bunden af en bygning, og overtryk under loftet (Kalamees et al., 2007). Der kan dog i varmt vejr og/eller under visse vindforhold opstå perioder med omvendte forhold. Derfor er der risiko for, at eventuelle skimmelsporer fra tagrummet også kan overføres til boligen. Såfremt der findes skimmelvækst i tagrummet og nedadrettet luftstrøm, er der risiko for, at beboerne i boligen nedenunder udsættes for allergener, mykotoksiner, glukaner og VOC'er (flygtige organiske forbindelser). Ovenstående har forskellig indflydelse på menneskelig sundhed, og tilstedeværelsen af skimmel kan i høje koncentrationer medføre både allergiske reaktioner, luftvejsproblemer, inflammation, hovedpine, træthed m.m. Dette er påvist ved forskellige eksponeringsforsøg (Gravesen, Nielsen, & Fog Nielsen, 1997). Det antages, at sårbarheden over for tilstedeværelse af skimmel er individuel, og nogle kan således være væsentligt generet af skimmel, mens andre ikke påvirkes. Undersøgelser har vist overførsel af andre VOC'er gennem etagedæk (Du et al., 2015), så det er nærliggende at skimmel ligeledes kan være luftbåren, og overføres gennem en etageadskillelse. Det er netop mere viden omkring denne problemstilling, der er formålet med den nærværende undersøgelse.

3.3 Tæthed af loft

For at undgå både konvektion – som drives af forskelle i lufttrykket – og diffusion af vanddamp, bør man som udgangspunkt etablere en dampspærre med tætte samlinger. Der er dog for velventilerede uudnyttede tagrum ingen krav om en egentlig dampspærre, så længe lufttætheden kan sikres på en anden måde (Brandt et al., 2019; Hansen & Møller, 2019; Hansen, Møller, & Tvedebrink, 2019).

Derimod findes der i bygningsreglementet krav til bygningers lufttæthed, da utætheder kan medføre store varmetab fra bygningen og trækgener. Tætheden har også betydning for fugtforholdene i tagrummet og/eller tagkonstruktionen, afhængigt af tæthedsplanets placering. Trods opfyldelse af bygningsreglementets lufttæthedskrav, kan utætheder i begrænset omfang ikke helt undgås. Det er vigtigt at disse utætheder ikke er koncentreret omkring et begrænset areal, da dette kan medføre lokale fugtproblemer (Brandt et al., 2019).

I bygninger med kolde, uudnyttede tagrum, vil tæthedsplanet i reglen ligge i loftet mod tagrummet. Dampspærren kan udgøre tæthedsplanet, men ofte vil et pudset loft uden revner og sprækker anses for lufttæt og kunne forhindre den opadgående luftvandring tilstrækkeligt. I tilfælde hvor dampspærren udgør tæthedsplanet, er det nødvendigt at sikre tætheden ved samlinger med fx butylbånd eller en folieklæber der er afstemt til det pågældende membransystem. Ved pudsede lofter, eller lufttætte pladematerialer, skal disse samlinger ligeledes tættes. De store utætheder skal undgås, for at minimere konvektion, som betragtes som den største bidragsyder til luft og fugtoverførsel fra indeklima til tagrum. Loftslømme er ofte svage punkter i tæthedsplanet, men disse bør både være isolerede, og med tætningslister i kanterne for at undgå lækager (Geving & Thue, 2002). Ligeledes må tætheden bevares ved gennemføring af installationer og lign.

Det kan være svært at se eller måle om en loftkonstruktion er lufttæt. I mange ældre boliger er dampspærrens tilstand ofte ukendt og besværlig at tilse, da den ligger under loftsisoleringen. Det er muligt at samlinger er sluppet, eller perforeringer er forekommet i løbet af levetiden. I nogle tilfælde er dele af dampspærren udskiftet i forbindelse med renoveringer af enkelte værelser eller ved tilbygninger. Der kan derfor være stor forskel på beskaffenheden af dampspærren i en bolig. Den nuværende undersøgelse har derfor også som formål at give et billede af tætheden af loftet mellem bolig og tagrum i et udsnit af danske huse. Dette gøres ved at betragte resultaterne for luftoverføring igennem etageadskillelsen i huse både med og uden dampspærre. I analysen indgår også bygningernes alder, isoleringsmaterialet og årstiden.

3.4 Fugtkapacitet af isolering

Loftisolering udlægges på loftet for at reducere varmetabet gennem loft og tag. De traditionelle isoleringsmaterialer (stenuld, glasuld) har meget lav fugtkapacitet og betegnes som ikke-hygroskopiske. De vil derfor ikke binde fugt fra omgivelserne ved høj relativ fugtighed. Denne egenskab besidder til gengæld de cellulosebaserede isoleringsmaterialer, såsom træfiber og papiruld. Disse betegnes hygroskopiske, og kan binde 10-40 gange mere fugt, end de uorganiske mineraluldsisoleringer (Pedersen, de Place Hansen, Hjørlev Hansen, & Marsh, 2003). Da de cellulosebaserede isoleringsmaterialer besidder denne egenskab, er det nærliggende at forvente, at der ikke er samme risiko for evt. kondensdannelse, da isoleringen har mulighed for at optage den overskydende fugt, og afgive den igen, i modsætning til mineraluld. Denne egenskab til at optage og afgive fugt har dog vist sig ikke at spille nogen praktisk rolle for fugtforhold i velventilerede tagrum jævnfør et større fuldskala- og feltstudium (Hansen & Møller, 2019; Hansen et al., 2019). Nogle målinger indikerede et marginalt lavere fugtniveau i uopvarmede tagrum ved brug af hygroskopiske isoleringsmaterialer (Hansen & Møller, 2016a), mens andre undersøgelser ikke har påvist mærkbar effekt af isoleringsmaterialets fugtbuffer egenskaber (Hansen & Møller, 2019). Sidstnævnte undersøgelse fandt heller ikke betydelig effekt af hverken isoleringstykkelse eller dampspærre – så længe luftskiftet i tagrummet var tilstrækkeligt til at fjerne overskydende fugt. Udover ventilationen, som reducerer den teoretiske effekt af fugtbufferevnen (Rode & Peuhkuri, 2006), spiller det sandsynligvis også en rolle, at den bærende del af alle denne type tagkonstruktioner er lavet af træ, som også har en fugtbufferevne. Om isoleringens fugtbufferevne har en betydning for forholdene i tagrum er ligeledes en del af den nærværende undersøgelse.

The background of the page is decorated with a pattern of thin, dark blue wavy lines that flow across the entire surface. In the upper center, there is a solid dark blue circle containing the white number '4'.

4

METODE

4 METODE

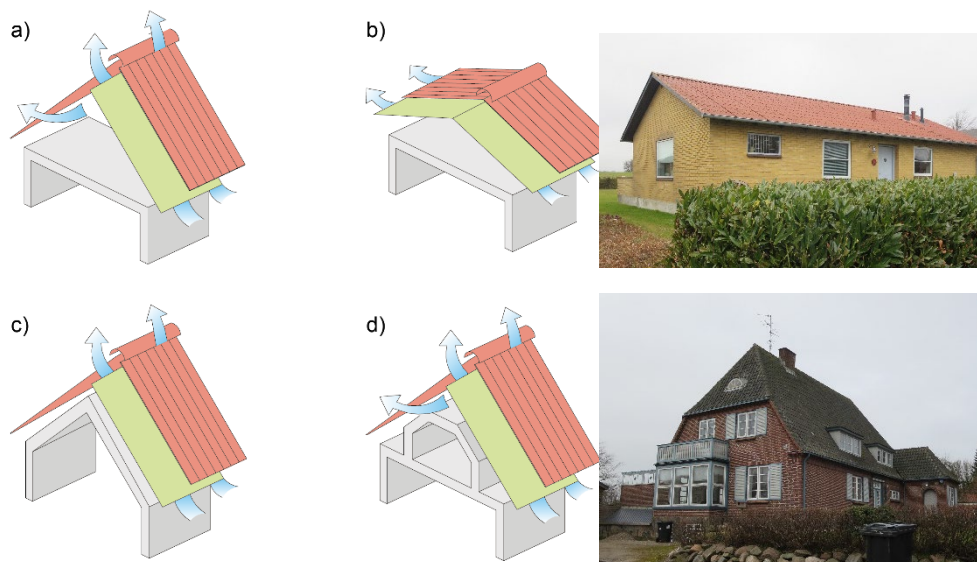
Til undersøgelsen er udvalgt 30 huse med uopvarmede, uudnyttede, ventilerede tagrum. Der blev udført sporgasmålinger for at fastslå ventilationsforhold og luftudveksling. Derudover monitoreredes temperatur- og fugtforhold i både bolig, tagrum og udeklima.

4.1 Udvælgelse af huse

Luftudvekslingen mellem et uopvarmet tagrum og boligen under er blevet undersøgt i 30 enfamiliehuse. Husene er udvalgt på baggrund af en intern rekruttering hos SBI (Statens Byggeforskningsinstitut), samt rekruttering via LinkedIn opslag. Der har været flere kriterier for udvælgelsen af huse. Det har været et krav, at tagrummene:

- Var tilgængelige, dvs. taget skulle have en hældning $>15^\circ$
- Var uopvarmede og uudnyttede

Derudover er der tilstræbt en ligelig fordeling mellem huse med og uden dampspærre, ligesom der er tilstræbt en ligelig fordeling af huse med loftsisolering af mineraluld og loftsisolering af cellulose baserede materialer. For at opnå ensartede ventilationsforhold i tagrummene, er der i udvælgelsen prioriteret huse, som ikke havde udnyttet tagetage. Der er dog også inkluderet enkelte huse med spidslofter. Det gælder for alle huse i undersøgelsen, at der forefindes naturlig ventilation i tagrummet; enten ved tagfod, kip, gavle og/eller loftsvinduer. figur 8 illustrerer de tagtyper der er inkluderet i undersøgelsen; type a) og d) indgår i rapporten.



FIGUR 8. Venstre: Mulige udformninger af ventilerede tage – kun tage af type a) og d) er inddraget i dette projekt (Brandt et al., 2009). Højre: Eksempler på de to tagudformninger a) øverst, og d) nederst (Jensen et al., 2016).

Ambitionen var at undersøge lige dele huse med mineraluld og cellulose baseret loftsisolering, samt med og uden dampspærre. Det kunne imidlertid ikke lade sig gøre at skaffe lige mange huse i begge kategorier. Fordelingen mellem huse med og uden dampspærre er 19-11. De fleste huse uden dampspærre er fra før 1970 og tilstanden af de dampspærre, der er opsat, er i mange tilfælde ukendt, især i de ældre huse. Derudover er der kun 3 af de 30

huse, som er med cellulosebaseret isolering. I alle tilfældene er den udlagt som efterisole-ring ovenpå original mineraluld. Andre undersøgelser har dog efterfølgende vist, at isole-ringstypen, isoleringstykkelsen, og dampspærren er uden større betydning for fugtforhold i disse tagrum (Hansen & Møller, 2017, 2018). Til gengæld er ventilation af tagrummet samt lufttætheden af loftet afgørende for fugtforholdene i tagrummet (Hansen & Møller, 2019).

Alle de undersøgte boliger er udstyret med mekanisk udsugning på badeværelser og i køkkener. Derudover har nogle af de undersøgte huse installeret mekaniske ventilationssys-temer. De fleste af disse er nyere huse fra efter 2000, men enkelte ældre bygninger har også installeret mekanisk ventilation. I de resterende boliger antages der at være naturlig ventilation.

Undersøgelsen inkluderer enfamiliehuse, som er opført i perioden 1928-2016 og en en-kelt præstegård fra 1719. Fordelingen af huse på opførelstidspunkt, ventilationssystem, dampspærre, isoleringsmateriale og tagkonstruktion kan findes i tabel 1.

TABEL 1. Fordeling af huse efter opførelsesår, samt angivelse af antal huse med og uden dampspærre, tagkonstruktion a) og d) iht. figur 8, ventilation og isoleringstype. MW indikerer isoleringsmateriale af mineraluld, mens CL repræsenterer cellulosebaseret isolering.

Årti		<1920	1920-1930	1930-1940	1940-1950	1950-1960	1960-1970	1970-1980	1980-1990	1990-2000	2000-2010	2010-2020	Total
Antal		1	2	2	1	5	6	5	3	0	3	2	30
Dampspærre	nej	1	1	2	1	3	2	0	1	0	0	0	11
	ja	0	1	0	0	2	4	5	2	0	3	2	19
Tagkonstruktion	a)*	0	0	1	0	5	6	5	3	0	3	2	25
	d)*	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	5
Mekanisk ventilation	nej	1	2	2	1	5	4	5	3	0	1	0	24
	ja	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	2	6
Isolering	MW	1	2	2	1	5	5	3	3	0	3	2	27
	CL	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	3

* der henvises til figur 8

En udspecificering af de 30 huse i forhold til tagrumstype, ventilationssystem, dampspærre og isoleringsmateriale findes i tabel 2. Husene er grupperet således at huse med dampspærre udgør 1-19, og huse uden dampspærre udgør 20-30. Inden for disse kategorier er husene listet efter alder. I tabellen angives desuden volumener for hhv. bolig og tagrum. Disse volumener er opmålt som beskrevet i afsnit 4.2.2.

TABEL 2. Beskrivelse af de 30 huse. MW indikerer isoleringsmateriale af mineraluld, mens CL repræsenterer cellulosebaseret isolering.

Hus	Byggeår	Dampspærre	Tagkonstruktion	Mekanisk ventilation	Isolering	Volumen bolig [m³]	Volumen tagrum [m³]
1	1928	ja	d)*		MW	571	59
2	1955	ja	a)*		MW	252	49
3	1956	ja	a)*		MW	365	130
4	1961	ja	a)*		MW	350	56
5	1964	ja ^b	a)*		MW	356	141
6	1964	ja	a)*	x	MW	390	85
7	1965	ja	a)*	x	MW	635	254
8	1970	ja	a)*		MW	378	70
9	1970	ja	a)*		MW+CL	365	110
10	1970	ja	a)*		MW	365	107
11	1970	ja	a)*		MW	391	133
12	1975	ja	a)*		MW+CL	387	130
13	1981	ja	a)*		MW	385	175
14	1986	ja	a)*		MW	289	140
15	2003	ja	a)*		MW	208	91
16	2003	Ja	a)*	x	MW	263	70
17	2006	ja	a)*	x	MW	450	108

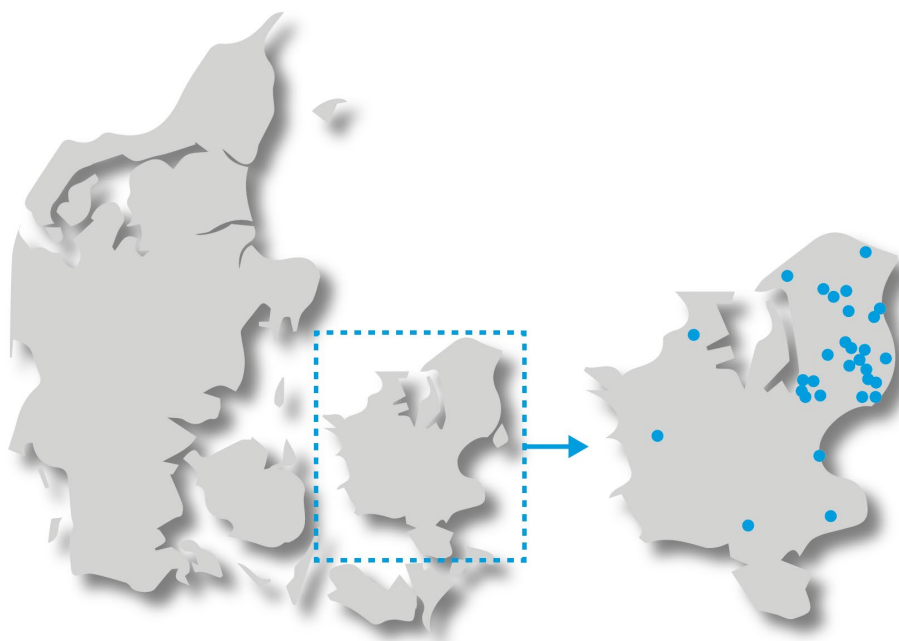
18	2015	ja	a)*	x	MW	366	85
19	2016	ja	a)*	x	MW	448	158
20	1719	nej	d)*		MW	1010	1777
21	1929	nej	d)*		MW	250	33
22	1934	nej	a)*		MW	650	91
23	1934	nej	d)*		MW	430	30
24	1943	nej	d)*		MW	320	12
25	1952	nej/ja ^a	a)*		MW	275	114
26	1956	nej	a)*		MW	380	153
27	1959	nej	a)*		MW	140	24
28	1960	nej	a)*		MW	340	141
29	1964	nej	a)*		MW+CL	364	114
30	1985	nej	a)*		MW	226	127

* der henvises til figur 8

^a der er ingen dampspærre i del gamle del af huset, men tilbygning i forlængelse af eksisterende hus er udført med dampspærre

^b dampspærre ikke tætnet ved spots

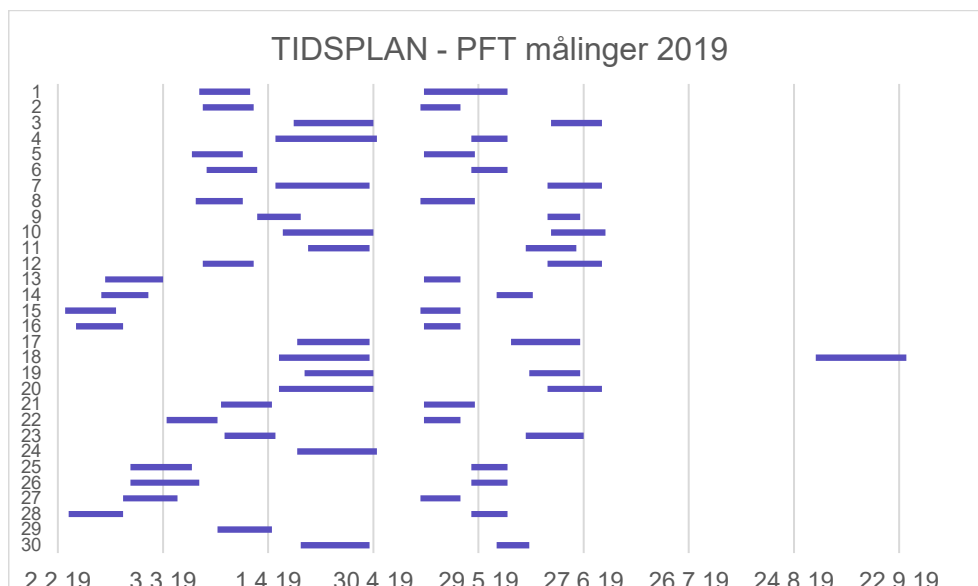
Alle husene var placeret på Sjælland, og de fleste i hovedstadsområdet. Fordelingen af husenes placering er afbildet på figur 9.



FIGUR 9. Placering af huse 1-30 på Sjælland, Danmark.

4.1.1 Måleperioder

I alle huse udførtes to målinger, med minimum 2 måneders mellemrum. Det var tilsigtet at indhente målinger fra vinterperioder og sommerperioder. Dog blev nogle 'vintermålinger' foretaget i april. Dette skyldes først og fremmest udfordringen med at finde huse til deltagelse i undersøgelsen, og dernæst begrænsning i forhold til mængden af udstyr, som tillod 10 målinger ad gangen. Som udgangspunkt skulle der måles i 14 dage pr. måling, men opsætning og nedtagning af udstyr afhang af beboerne, og hvornår disse havde mulighed for besøg. I gennemsnit havde målingerne en varighed på 15 dage. Den korteste måling var 9 dage, og den længste 28 dage. Varigheden af målinger udgør dog ingen problemer i forhold til resultaterne, som regnes som gennemsnitsværdier for den målte periode. På figur 10 ses måleperioderne for de 30 huse.



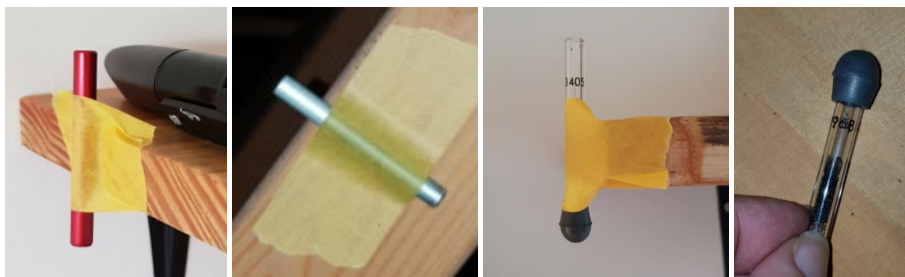
FIGUR 10. Oversigt over måleperioder i huse 1-30.

4.2 PFT-metoden

PFT står for perfluorcarbon tracer, og PFT-metoden er en 'multi-sporgasmetode efter konstant-doseringsprincippet baseret på såkaldt passiv opsamlingsteknik'. (Bergsøe, 1992). Metoden anvendes til at bestemme tilførslen af udeluft i en bygning, eller i forskellige zoner i en bygning. Derudover kan metoden, såfremt der anvendes flere sporgastyper (deraf 'multi'), fastlægge den interne luftudveksling mellem zoner. Ved konstant dosering forstås, at sporgas doseringen i zonerne er kontinuerlig og med en kendt emissionsrate. Ved passiv opsamling forstås en opsamlingsteknik, som fungerer passivt, altså uden ekstern energiforsyning m.m. De anvendte sporgastyper (perfluorocarboner) er organiske forbindelser af perfluoralkylcycloalkan-familien. Disse gastyper er særligt egnede, da de er uskadelige for både mennesker og miljø samt kemisk stabile. Derudover er baggrundskoncentrationen i atmosfæren lav, de er flygtige, og de giver en kraftig respons i analysen. Metoden blev første gang introduceret i 1982 af Dietz og Cote (Dietz & Cote, 1982), som en simplere og billigere metode til måling af luftinfiltration. Metoden genererer gennemsnitsværdier for lufttilførsel, og der kan gennemføres PFT-målinger i kortere eller længere perioder – almindeligvis 1-2 uger.

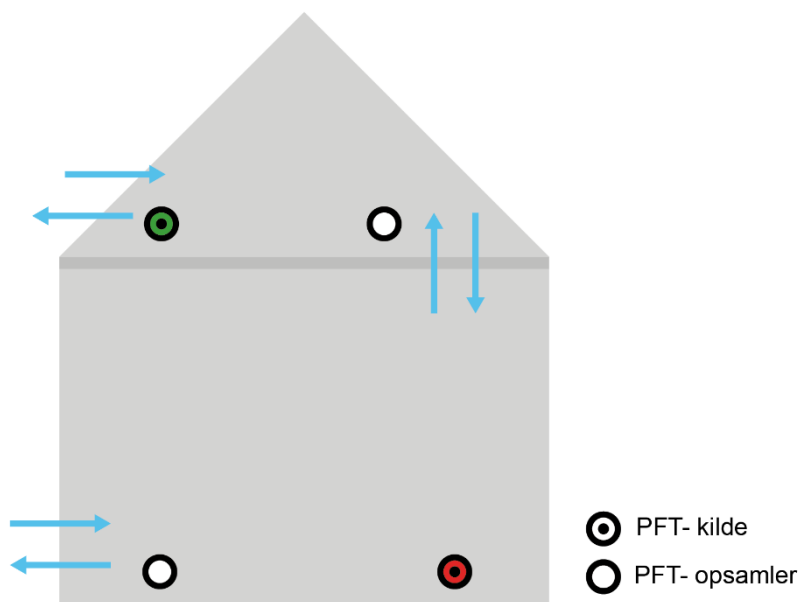
4.2.1 Princippet i metoden

Til anvendelse af PFT-metoden skal benyttes følgende udstyr; passive sporgaskilder og passive opsamlingsrør (figur 11). Derudover skal der foretages temperaturmålinger, der benyttes til fastsættelse af emissionsraten. Til analyse af opsamlingsrørene efter målingerne, benyttes termisk desorption og gaskromatografi med ECD (electron capture detector). De passive sporgaskilder er små metalrør, hvori en sporgas er komprimeret og lukket af med silikone, som gassen kan diffundere igennem. Emissionsraten fra sporgaskilderne er temperaturafhængig, og på baggrund af en gennemsnitstemperatur i rumluften samt angivet volumen i den specifikke zone, estimeres emissionsraten [nl/h]. Opsamlingsrørene består af et lille glasrør med et adsorptionsmateriale, Amborsorb type 347, som er beslægtet med aktivt kul. Opsamlingsraten af perfluorocarbon gasserne baseres på rørets dimensioner og en empirisk bestemt diffusionskoefficient for perfluorocarbon i luft (Bergsøe, 1992). Når røret ikke er i brug, er begge ender lukket med en prop for at undgå kontaminering under transport m.m. Når opsamlingsrøret skal i brug, fjernes proppen i den ene ende.



FIGUR 11. Sporgaskilder og opsamlingsrør til PFT-metoden. De røde sporgaskilder indeholder PMCH, som er anvendt i boligzonen. De grønne sporgaskilder indeholder PMCP og er anvendt i tagrum.

I dette projekt benyttes 2-zone princippet, hvori boligen betragtes som én zone, og tagrummet som en anden zone (se figur 12). Der er benyttet 2 typer sporgasser, hvorved luftudvekslingen mellem de to zoner i måleperioden kan bestemmes. I nærværende projekt er der benyttet sporgasser af typerne PMCH (perfluormethylcyclohexan) i bolig-zonen, og PMCP (perfluormethylcyclopentan) i tagrums-zonen.



FIGUR 12. Principskitse af 2-zone model for PFT-målinger.

Ved at kende emissions- og opsamlingsraterne for de to sporgastyper, måleperioden samt de gennemsnitlige temperaturer i zonerne, kan infiltration og exfiltration bestemmes, både i forhold til udeluft og zonerne imellem. Når infiltrationen deles på volumenerne af zonerne, bestemmes også luftskiftet i de to zoner. Metoden og omregningerne er beskrevet i (Bergsøe, 1992).

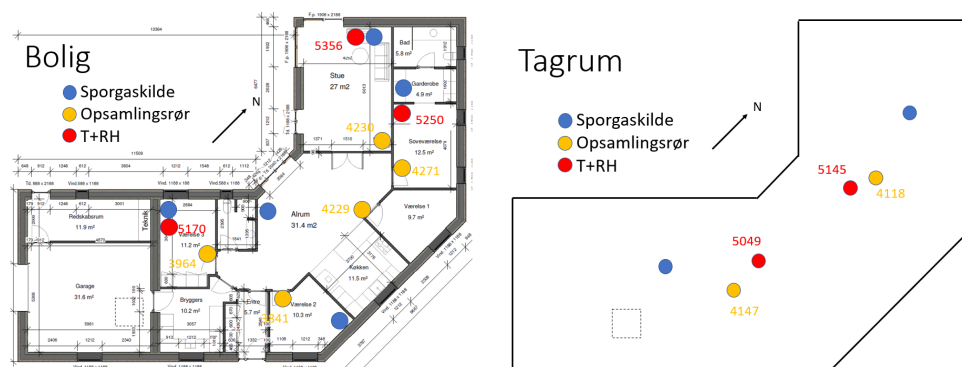
4.2.2 Opsætning af sporgaskilder og opsamlingsrør i dette projekt

Som nævnt, benyttes i dette projekt 2-zone modellen. Dermed er sporgaskilder samt opsamlingsrør og temperatur/relativ fugtighedsmålere, opsat i både bolig og tagrum. De 30 huse har naturligvis varierende rumdeling og geometri. Som udgangspunkt placeres 2 sporgaskilder og to opsamlingsrør i tagrummet, samt 1-2 temperatur/relativ fugtighedsmålere. I et enkelt tilfælde, var tagrummet så lille, at det var tilstrækkeligt at opsætte én sporgaskilde og ét opsamlingsrør. I boligzonen blev der placeret 4-6 sporgaskilder og opsamlingsrør, afhængig af zonens størrelse. Antallet og placeringen af temperatur- og luftfugtighedsmålere i

boligzonen blev generelt bestemt efter behov, der blev fx taget hensyn til, om der var store temperaturforskelle mellem rummene.

Da sporgaskilderne er temperaturafhængige, blev de ikke placeret i nærheden af varmekilder, på kolde overflader, elektroniske apparater eller steder med mulighed for direkte solpåvirkning. Sporgaskilderne blev generelt placeret således i rummet, at der var mulighed for, at sporgasserne blev blandet med lufttilførsel. De blev altså, hvor det var muligt, placeret i enden af rummet nær et vindue. Opsamlingsrørene blev placeret i den anden ende af rummet, som regel nær døren. Opsamlingsrørene er som sådan ikke temperaturafhængige. Dog er det ikke hensigtsmæssigt at placere dem, hvor der vil være en væsentlig temperaturforskel, da lokale luftbevægelser kan være atypiske og forstyrre målingen. Opsamlingsrørene placeres således, at luftmålingerne vil være repræsentative for rumluften. Der skal være et par meters afstand mellem sporgaskilde og opsamlingsrør. På figur 13 ses udstyrsplacering i et af de tredive huse. Placeringer i alle huse præsenteres i bilag 9.1.

Luftvolumenet i boligzonen hhv. tagrummet blev bestemt ved at måle op på plantegninger, hvis disse var tilgængelige. Højde i tagrum og bolig blev målt med håndholdt laserafstandsmåler ved besøg på stedet. I tilfælde uden plantegninger, blev arealet målt op på stedet, ligeledes med håndholdt afstandsmåler.



FIGUR 13. Eksempel på placering af udstyr i et af de 30 hus.

4.2.3 Instrumenter og usikkerheder

Der var en række usikkerheder forbundet med udførsel af PFT-målinger. 2 målinger fra vinterperioden samt 3 målinger fra sommerperioden er desværre udgået. Derudover ville beboerne i to huse ikke have gentaget målingen. Der findes derfor 28 målinger for vinterperioden, men kun 25 målinger for sommerperioden.

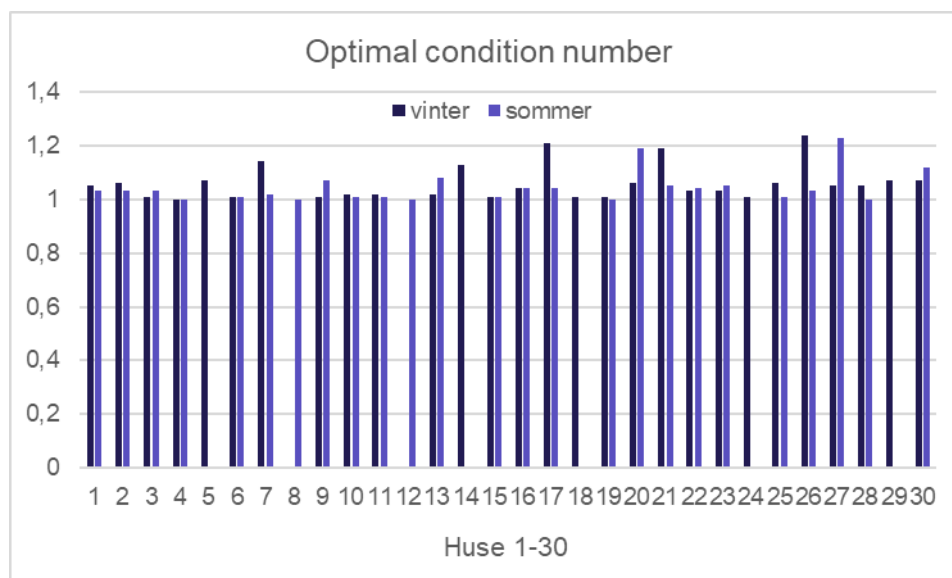
Emissionsraten er afhængig af temperatur og udregnes på basis af gennemsnits temperaturen i måleperioden. Usikkerheden på emissionsraten er dermed bestemt af usikkerheden på temperaturmålingerne og afvigelse fra gennemsnittet.

Usikkerhederne på de beregnede volumenstrømme defineres af et ligningssystem, der inkluderer usikkerheder på estimeret tilført sporgasmængde og usikkerheder i sporgaskoncentrationen og angives i (Bergsøe, 1992). Formen på ligningssystemet er:

$$\Delta Q = [(C^{-1})^2(\Delta M^2 + \Delta C^2 Q^2)]$$

Hvor ΔQ angiver en matrix for usikkerheden på volumenstrømme, ΔM angiver en matrix for usikkerheden på de tilførte sporgasmængder, ΔC angiver en matrix for usikkerheden på sporgaskoncentrationen, og C^{-1} er den reciproke matrice for koncentrationsmatricen C . For vurdering af om PFT-metodens forudsætninger har været opfyldt under målingerne, defineres et 'optimal conditions number', $K(C)$, som også er et udtryk for stabiliteten i usikkerhedsberegningerne. En $K(C)$ værdi på 1 er således tegn på en måling foretaget under optimale

forudsætninger. Jo højere værdier for $K(C)$, desto større usikkerhed er der behæftet med målingen. For 2-zones målinger bør $K(C)$ ikke overstige 3. På figur 14 ses de opnåede værdier for 'optimal condition number' for de 30 huses vinter- og sommermålinger. Som det fremgår af figuren, er alle medtagede målinger tæt på den optimale værdi, 1 og under maksimal grænsen 3. De 5 målinger, der er behæftet med fejl, er fjernet og fremgår ikke af denne oversigt.



FIGUR 14. 'Optimal condition number' for de 30 huse, vinter og sommermålinger.

4.3 Måling af temperatur og relativ fugtighed

I samme periode som sporgasmålingerne blev udført, er der med dataloggere målt temperatur (θ) og relativ fugtighed (RF) på timebasis i alle husene. De målte værdier for temperatur og relativ fugtighed er omregnet til absolut fugt (vanddampindhold), vha. følgende formler:

$$\text{Mættet damptryk [Pa]} \quad p_m = 610,5 * e^{\frac{17,269 * \theta}{237,3 + \theta}}$$

$$\text{Aktuelt damptryk [Pa]} \quad p_v = RF\% \cdot p_m$$

$$\text{Vanddampindhold [g/m}^3\text{]} \quad v = \frac{p_v}{0,4615 \cdot (\theta + 273,15)}$$

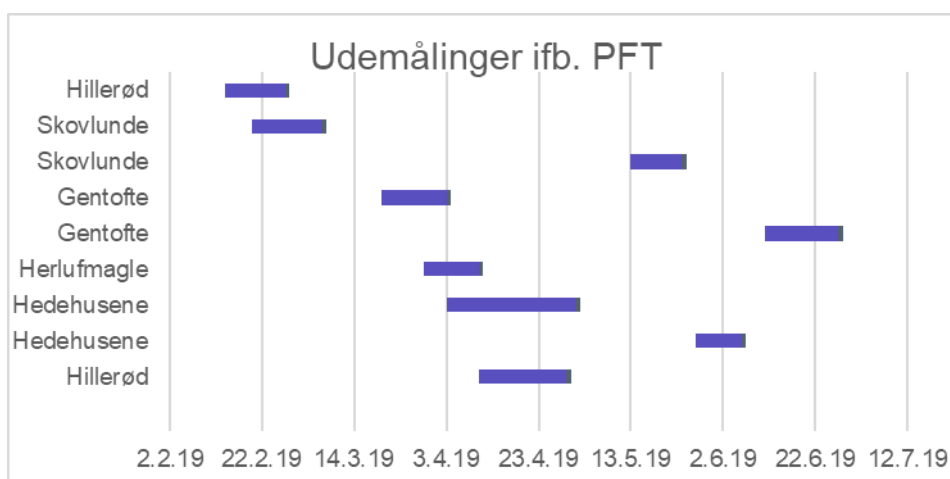
4.3.1 Placering af følere

Temperatur og relativ fugtighed blev registreret både i boligzonerne og tagrummene. I boligzonerne var loggerne placeret i 2-4 rum. I tagrummene antages der at være et relativt ens fugtforhold. I de fleste tilfælde blev der derfor kun placeret en datalogger i tagrummene. I nogle tilfælde dog to. Loggerne blev placeret således, at de ikke blev påvirket af direkte sol, varmerør, vand mv. Følerne blev ligeledes placeret over børne- og hundehøjde og generelt således, at de ikke ville være til gene for beboerne. I de fleste tilfælde blev dataloggerne placeret fx ovenpå billederammer, på hylder eller skabe/kommoder. I tagrummene blev dataloggeren tapet til et spær og placeret i halv højde mellem gulv og kip. Eksempler på placeringer af temperatur og relativ fugtighedslogger, ses på figur 15.



FIGUR 15. Eksempler på placeringer af temperatur og relativ fugtigheds-sensorer i hhv. tagrum (venstre) og bolig (højre).

Under måling i husene blev der, hvor der var mulighed for forsvarlig placering, desuden placeret følere udenfor. Perioder med udemålinger er illustreret på figur 16. Udemålingerne er foretaget på forskellige adresser i hhv. Nordsjælland, Storkøbenhavn og Sydsjælland.



FIGUR 16. Perioder hvor temperatur og RH er registreret i udeklimaet.

4.3.2 Instrumenter og usikkerheder

Til registrering af temperatur og luftfugtighed blev der benyttet EL-USB-2+ dataloggere fra EasyLog. Producenten angiver, at disse måler i intervallerne; temperatur : [-35;80°C] og relativ fugtighed: [0;100%]. Dataloggerne opsamler data i de givne måleintervaller, i dette tilfælde hver time. Data aflæses direkte fra loggeren efter indsamling i husene. Producentens angivne usikkerheder på målt data angives i tabel 3.

TABEL 3. Temperatur- og relativ fugtighedsloggerens angivne usikkerheder.

Parameter	Usikkerhed	Under gældende forhold
Temperatur, θ	0,55°C	5-60°C
Relativ fugtighed, RF	2,25%	20-80%

The background of the page is decorated with a pattern of thin, dark blue wavy lines that flow across the entire surface. In the upper center, there is a solid dark blue circle containing the white number '5'.

5

RESULTATER

5 RESULTATER

I dette afsnit præsenteres de opnåede resultater. Målinger, der tydeligt var behæftet med fejl, er ikke medtaget i dette afsnit. Det drejer sig om følgende målinger:

- Hus 8, vinter – usandsynlige rater af begge sporgastyper.
- Hus 12, vinter – stort set ingen PMCP registreret.
- Hus 14, sommer – usandsynlige rater af begge sporgastyper.
- Hus 5, sommer – ingen zonetemperatur registreret.
- Hus 18, sommer – usandsynlige rater af PMCH i alle samplere.
- Huse 24 og 29 ønskede ikke at deltage i 2. runde af målinger (sommer).

5.1 PFT-målinger

I tabel 4 præsenteres de målte værdier for luftskifter i boliger og tagrum, såvel som den målte udveksling i begge retninger for både vinter- og sommerperiode. Af tabellen fremgår det, at der overvejende er større luftskifte i de fleste boliger om sommeren end om vinteren. Endvidere fremgår det, at luftoverføringen mellem de to zoner i de fleste tilfælde er større om vinteren i begge retninger. Der findes dog også tilfælde med modsatte tendenser, at luftoverføring er større om sommeren.

TABEL 4. De målte værdier for luftskifter og luftudveksling for sommer- og vinterperiode. Værdierne er gennemsnitsværdier for måleperioden.

Hus	Dampspærre	Tagkonstruktion	Mekanisk vent.	Isolering	VINTER				SOMMER			
					Luftskifte, bolig[h ⁻¹]	Luftskifte, tagrum[h ⁻¹]	Nedadgående overføring[m ³ /h]	Opadgående overføring[m ³ /h]	Luftskifte, bolig[h ⁻¹]	Luftskifte, tagrum[h ⁻¹]	Nedadgående overføring[m ³ /h]	Opadgående overføring[m ³ /h]
1	x	d)*		MW	0,34	20,2	53,1	123,4	0,54	12	50,6	74,6
2	x	a)*		MW	0,35	1,76	21,5	14,8	0,44	1,44	18,7	7,6
3	x	a)*		MW	0,43	7,08	15,9	80,3	0,31	4,56	24,3	41,5
4	x	a)*		MW	0,17	7,24	4,3	7,5	0,17	7,24	5,6	6,3
5	x	a)*		MW	0,1	7,91	20,8	18,8				
6	x	a)*	x	MW	0,37	5,46	12,6	27,4	0,41	2,65	7	25,2
7	x	a)*	x	MW	0,08	1,04	35,9	28,4	0,07	0,8	5,9	21,6
8	x	a)*		MW					0,16	2,15	3,8	5
9	x	a)*		MW+CL	0,25	4,27	12,7	20,7	0,36	4,01	55,1	31,9
10	x	a)*		MW	0,08	9,89	7,4	9	0,41	10,51	20,5	36,7
11	x	a)*		MW	0,12	4,85	8,2	39,5	0,33	3,84	9,4	54,3
12	x	a)*		MW+CL					0,44	3,26	13,4	11,5
13	x	a)*		MW	0,21	1,51	7,8	32,9	0,13	3,04	23,8	40,1
14	x	a)*		MW	0,08	3,41	23,4	13,2				
15	x	a)*		MW	0,31	1,72	5,6	10,3	0,42	2,47	7	16,5
16	x	a)*	x	MW	0,18	1,75	15,6	2,7	0,18	4,19	16,6	3,2

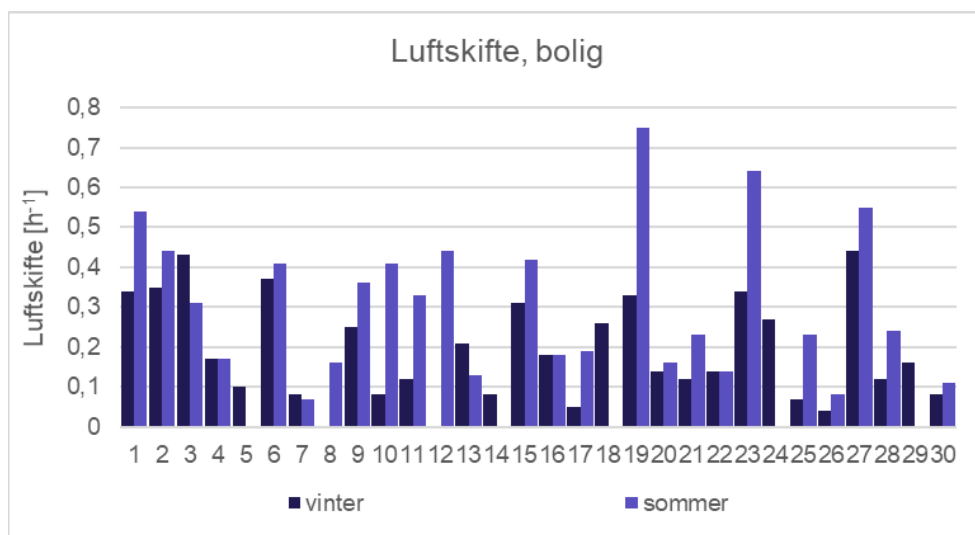
17	x	a)*	x	MW	0,05	18,7	41,1	23,4	0,19	28,2	29,4	67,9
18	x	a)*	x	MW	0,26	11,4	12,9	5,4				
19	x	a)*	x	MW	0,33	4,41	14,3	14,1	0,75	4,31	21	25,9
20		d)*		MW	0,14	3,07	71,2	58,5	0,16	1,3	224,7	105,7
21		d)*		MW	0,12	2,64	29,2	10,1	0,23	17,3	22,5	11,6
22		a)*		MW	0,14	0,9	4,6	22,4	0,14	0,49	1,8	15,2
23		d)*		MW	0,34	8,27	21	34,7	0,64	4,61	5,4	55,5
24		d)*		MW	0,27	19,6	4,5	24,1				
25		a)*		MW	0,07	4,4	10,3	9,7	0,23	3,64	7,5	9,2
26		a)*		MW	0,04	3,58	36,7	8,7	0,08	3	8,7	8,4
27		a)*		MW	0,44	2,89	4,1	25	0,55	1,97	22,8	34,7
28		a)*		MW	0,12	2,95	17,5	14,2	0,24	1,55	4,8	9,1
29		a)*		MW+CL	0,16	18,2	32,9	18,1				
30		a)*		MW	0,08	8,79	9,9	16,4	0,11	7,68	22,6	17,3

* der henvises til figur 8

I afsnit 5.1.1-5.1.3 præsenteres resultaterne grafisk og i skemaer med nøgletal. Som det fremgår af tabel 5, udviser hus 20 meget store op- og nedadrettede luftstrømme. Dette hus er atypisk i sin udformning, da det er en gammel præstegård med et stort loftstum i to etager. I resultatbehandlingen vil denne være udtaget fra gennemsnitsbetragtninger af luftoverføring mellem zonerne.

5.1.1 Luftskifte i bolig

Luftskifterne målt i boligzonerne for de 30 huse for både vinter- og sommerperiode, fremgår af figur 17.



FIGUR 17. Luftskifte i bolig-zonen for de 30 huse i både sommer- og vinterperioden.

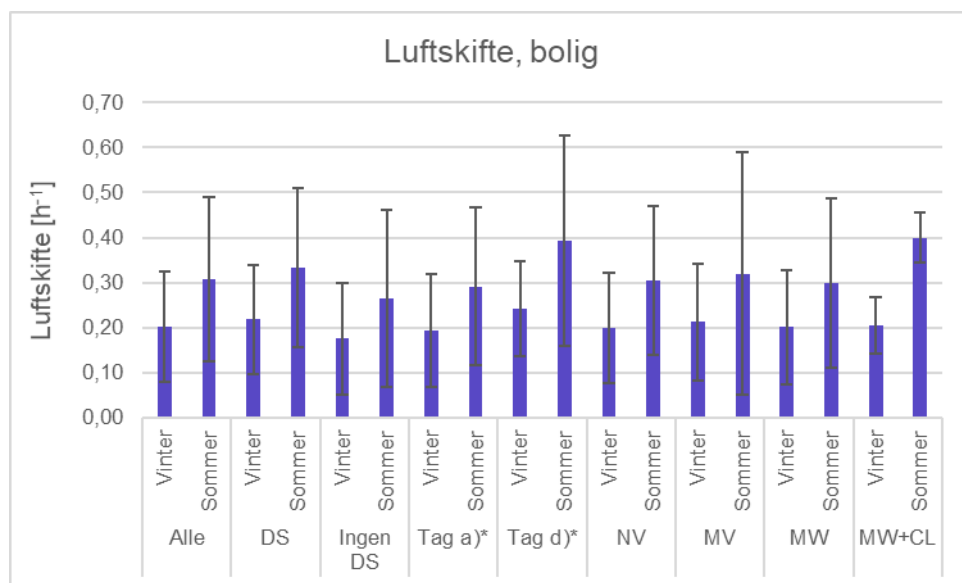
Nøgletal for luftskifterne bestemt i bolig-zoner, fordelt på dampspærre eller ej, tagrumstypen a) eller d), ventilationssystem, samt isoleringsmateriale er opsummeret i tabel 5.

TABEL 5. Nøgletal for målte luftskifter i bolig-zonen de 30 huse fordelt på kategorier.

		Gennemsnit [h ⁻¹]	Min [h ⁻¹]	Max [h ⁻¹]	Standard afvigelse [h ⁻¹]
Alle huse	Vinter	0,20	0,04	0,44	0,12
	Sommer	0,31	0,07	0,75	0,18
Med dampspærre	Vinter	0,22	0,05	0,43	0,12
	Sommer	0,33	0,07	0,75	0,18
Uden dampspærre	Vinter	0,17	0,04	0,44	0,12
	Sommer	0,26	0,08	0,64	0,20
Tagkonstruktionstype a)	Vinter	0,19	0,04	0,44	0,13
	Sommer	0,29	0,07	0,75	0,17
Tagkonstruktionstype d)	Vinter	0,24	0,16	0,34	0,11
	Sommer	0,39	2,64	0,64	0,23
Kun naturlig ventilation	Vinter	0,20	0,04	0,44	0,12
	Sommer	0,30	0,08	0,64	0,16
Mekanisk ventilation	Vinter	0,21	0,05	0,37	0,13
	Sommer	0,32	0,07	0,75	0,27
Mineraluldisisolering	Vinter	0,20	0,04	0,44	0,13
	Sommer	0,30	0,07	0,75	0,19
Mineralulds- + cellulose-baseret isolering*	Vinter	0,21	0,16	0,25	0,06
	Sommer	0,40	0,36	0,44	0,06

*Disse værdier er kun baseret på resultater fra 2 huse. Der er totalt 3 huse med mineraluld og cellulose baseret isolering, men én af disse målinger udgik for vinterperioden, og en anden af disse målinger udgik for sommerperioden.

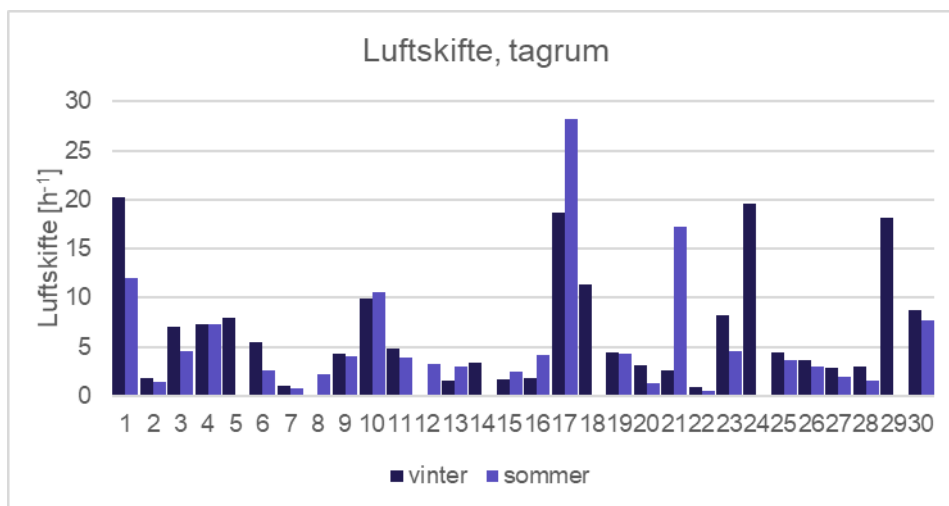
På figur 18 ses det gennemsnitlige luftskifte målt i boligzonerne fordelt på typer af konstruktioner, herunder: med/uden dampspærre, tagtype a) og d), naturlig og mekanisk ventilation, samt isoleringstype mineraluld eller mineraluld + cellulosebaseret isolering. Det fremgår af figuren og ovenstående tabel 5 at luftskiftet i alle tilfælde er større om sommeren. Derudover viser de gennemsnitlige betragtninger, at alle kategorierne er i samme størrelsesorden, og ingen skiller sig signifikant ud.



FIGUR 18. Gennemsnitligt luftskifte i boligerne med standard afvigelse, fordelt på typer: hhv. for alle de undersøgte huse (Alle), huse med og uden dampspærre (DS), tagtype a) og d), naturlig ventilation (NV) og mekanisk ventilation (MV), samt isoleringstype: mineraluld (MW) eller begge isoleringstyper (MW+CL).

5.1.2 Luftskifte i tagrum

Luftskifterne målt i tagrummene i de 30 huse i både vinter- og sommerperiode, fremgår af figur 19.



FIGUR 19. Luftskifte i tagrums-zonen for de 30 huse i både sommer- og vinterperiode.

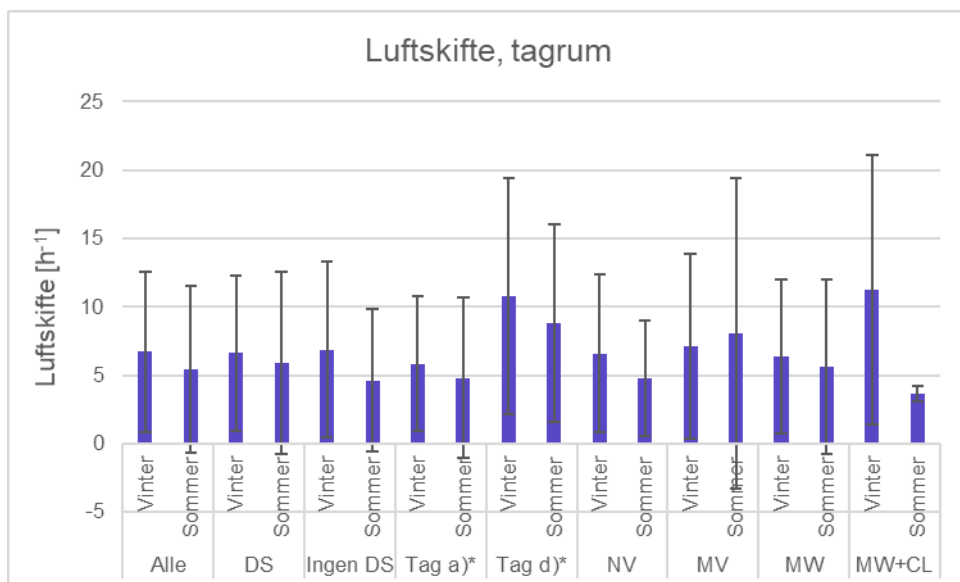
Nøgletal for luftskifterne bestemt i tagrums-zoner, fordelt på tagrumstypen a) eller d), dampspærre eller ej, samt isoleringsmateriale er opsummeret i tabel 6.

TABEL 6. Nøgletal for målte luftskifter i tagrums-zonen for de 30 huse fordelt på kategorier

		Gennemsnit [h ⁻¹]	Min [h ⁻¹]	Max [h ⁻¹]	Standard afvigelse [h ⁻¹]
Alle huse	Vinter	6,71	0,90	20,20	5,88
	Sommer	5,45	0,49	28,20	6,12
Med dampspærre	Vinter	6,62	1,04	20,20	5,70
	Sommer	5,92	0,80	28,20	6,68
Uden dampspærre	Vinter	6,84	0,90	19,60	6,42
	Sommer	4,62	0,49	17,30	5,22
Tagkonstruktionstype a)	Vinter	5,83	0,90	18,70	4,93
	Sommer	4,81	0,49	28,20	5,87
Tagkonstruktionstype d)	Vinter	10,76	2,64	20,20	8,64
	Sommer	8,80	1,30	17,30	7,22
Kun naturlig ventilation	Vinter	6,60	0,90	20,20	5,78
	Sommer	4,80	0,49	17,30	4,23
Mekanisk ventilation	Vinter	7,13	1,04	18,70	6,76
	Sommer	8,03	0,80	28,20	11,36
Mineraluldisolering	Vinter	6,36	0,90	20,20	5,63
	Sommer	5,61	0,49	28,20	6,36
Mineralulds- + cellulose-baseret isolering*	Vinter	11,24	4,27	18,20	9,85
	Sommer	3,64	3,26	4,01	0,53

*Disse værdier er kun baseret på resultater fra 2 huse. Der er totalt 3 huse med mineraluld og cellulose baseret isolering, men én af disse målinger udgik for vinterperioden, og en anden af disse målinger udgik for sommerperioden.

På figur 20 ses det gennemsnitlige luftskifte målt i tagrummene, fordelt på typer af konstruktioner, herunder med/uden dampspærre, tagtype a) og d), naturlig og mekanisk ventilation, samt isoleringstype mineraluld eller mineraluld + cellulose baseret isolering. Det fremgår af figuren og ovenstående tabel 6 at luftskiftet i tagrummet varierer i højere grad sammenlignet med luftskiftet i boligerne. I tagrummet findes i næsten alle kategorier større luftskifte i vintersæsonen end i sommerperioden. Standardafvigelserne for luftskifte i tagrummene er dog også signifikante og understreger stor variation i den naturlige ventilation i tagrummet, som er meget afhængig af det varierende udeklima.



FIGUR 20. Gennemsnitligt luftskifte i tagrummene med standardafvigelse, fordelt på typer; hhv. for alle de undersøgte huse (Alle), huse med og uden dampspærre (DS), tagtype a) og d), naturlig ventilation (NV) og mekanisk ventilation (MV), samt isoleringstype; mineraluld (MW) eller begge isoleringstyper (MW+CL).

5.1.3 Luftudveksling mellem zoner

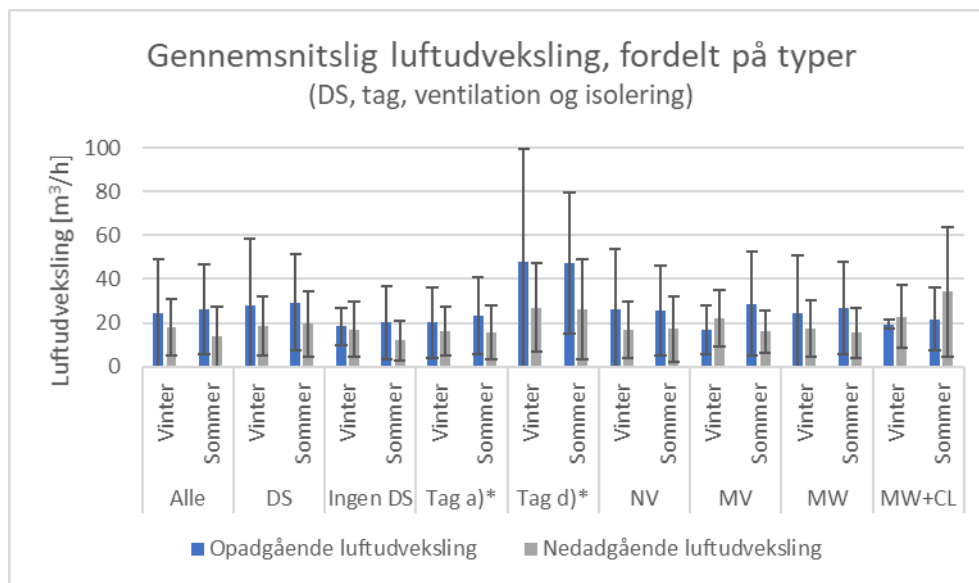
Den opnåede luftudveksling mellem de to zoner, bolig og tagrum, er opsummeret i tabel 7.

TABEL 7. Opad- og nedadgående luftoverføring mellem bolig og tagrum fordelt på kategorier i både sommer- og vinter periode. Hus 20 er udtaget for gennemsnitsbetragtninger af luftoverføring.

		Opadgående luftoverføring		Nedadgående Luftoverføring	
		Gennemsnit [m³/h]	Standard afvigelse [m³/h]	Gennemsnit [m³/h]	Standard afvigelse [m³/h]
Alle huse	Vinter	24,3	24,9	17,9	12,8
	Sommer	26,3	20,6	13,7	13,7
Med dampspærre	Vinter	27,8	30,6	18,4	13,4
	Sommer	29,4	22,1	19,5	15,2
Uden dampspærre	Vinter	18,3	8,3	17,1	12,4
	Sommer	20,1	16,7	12,0	9,0
Tagkonstruktionstype a)	Vinter	20,1	16,0	16,3	11,0
	Sommer	23,3	17,5	15,7	12,3
Tagkonstruktionstype d)	Vinter	48,1	51,2	27,0	20,2
	Sommer	47,2	32,3	26,2	22,8
Kun naturlig ventilation	Vinter	26,4	27,5	16,7	12,9
	Sommer	25,6	20,3	17,3	14,8
Mekanisk ventilation	Vinter	16,9	11,2	22,1	12,9
	Sommer	28,8	23,8	16,0	9,8
Mineraluldisolering	Vinter	24,7	25,9	17,5	13,0
	Sommer	26,7	21,2	15,4	11,6
Mineralulds- + cellulose-baseret isolering*	Vinter	19,4	1,8	22,8	14,3
	Sommer	21,7	14,4	34,3	29,5

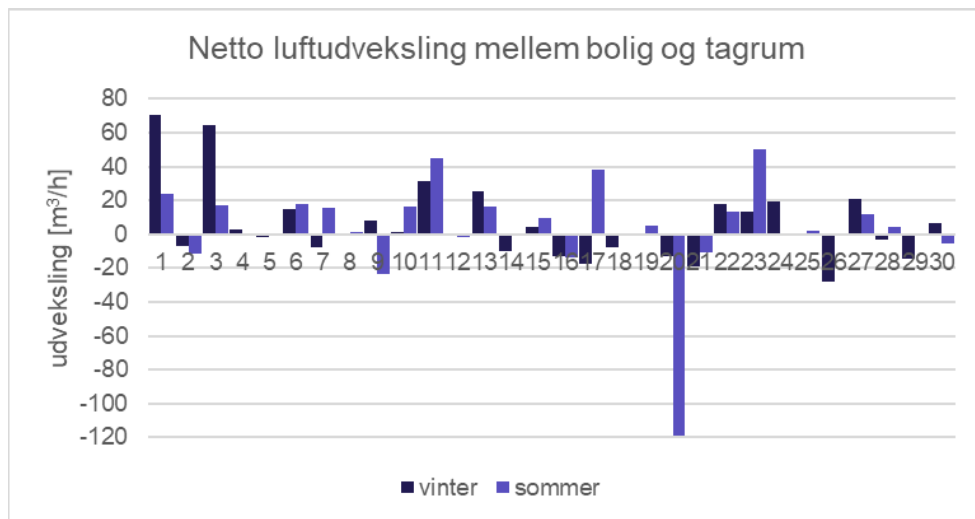
Figur 21 illustrerer fordelingen af luftudvekslingen mellem bolig og tagrum som gennemsnitlige betragtninger for samtlige huse i undersøgelsen. Desforuden er husene i diagrammet fordelt på typer, herunder med/uden dampspærre, tagtype a) og d), naturlig og mekanisk ventilation, samt isoleringstype mineraluld eller mineraluld og cellulose baseret isolering. Det fremgår af figuren og af tabel 7, at der for stort set alle typer er højere opadgående end nedadgående luftoverføring. Undtagelsen er huse med mekanisk ventilation og huse med både mineraluld og cellulose på loftet. Gennemsnittet for det sidste er dog kun baseret på to huse, hvorfor dette resultat ikke kan anses som repræsentativ. Det fremgår desuden af figur 21, at der for tagrumstyper d) er betragteligt større luftoverføring sammenlignet med både tagrum-

stype a) og de øvrige kategorier. Dette kan skyldes bedre naturlige ventilationsforhold i tagrum af typen d). Der ses dog ikke signifikant forskel på med/uden dampspærre, ventilationsforhold i boligen eller isoleringstype.



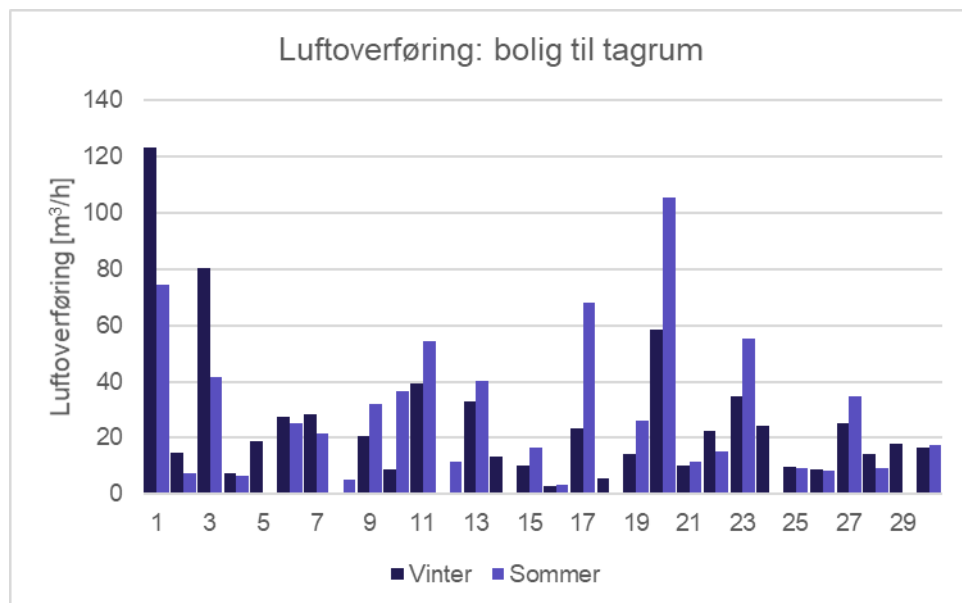
FIGUR 21. Gennemsnitlig luftoverføring mellem bolig og tagrum i begge retninger, sommer og vinter samt fordelt på typer hhv. for alle de undersøgte huse (Alle), huse med og uden dampspærre (DS), tagtype a) og d), naturlig ventilation (NV) og mekanisk ventilation (MV), samt isoleringstype mineraluld (MW) eller begge isoleringstyper (MW+CL). Hus 20 er udtaget for gennemsnitsbetragninger af luftoverføring.

På figur 22 præsenteres nettoluftudvekslingen mellem de to zoner – altså luftudvekslingen mellem bolig og tagrum, for både sommer- og vintermålinger i de 30 huse. Positive værdier angiver en, for perioden dominerende, opadrettet luftoverførsel (fra bolig til tagrum), og negative værdier repræsenterer, for perioden dominerende, nedadgående luftoverførsel (fra tagrum til bolig). Det bemærkes, at de angivne værdier for luftstrømme er gennemsnitsværdier for måleperioden, og at det derfor er sandsynligt, at der kan have været tidspunkter i løbet af måleperioden, hvor luftoverføringen er forekommet også i modsat retning ift. angivet. Størrelsesorden af de øjeblikkelige luftstrømme kendes derfor heller ikke. Det fremgår af figur 22, at det varierer meget fra hus til hus, om der er mest opadgående eller nedadgående luftoverføring, samt om netto luftoverføringen dominerer i sommer- eller vinterperioden. Det fremgår dog, at der er overvejende er mest opadgående luftoverføring, hvilket er i overensstemmelse med teorien beskrevet i afsnit 3.2.

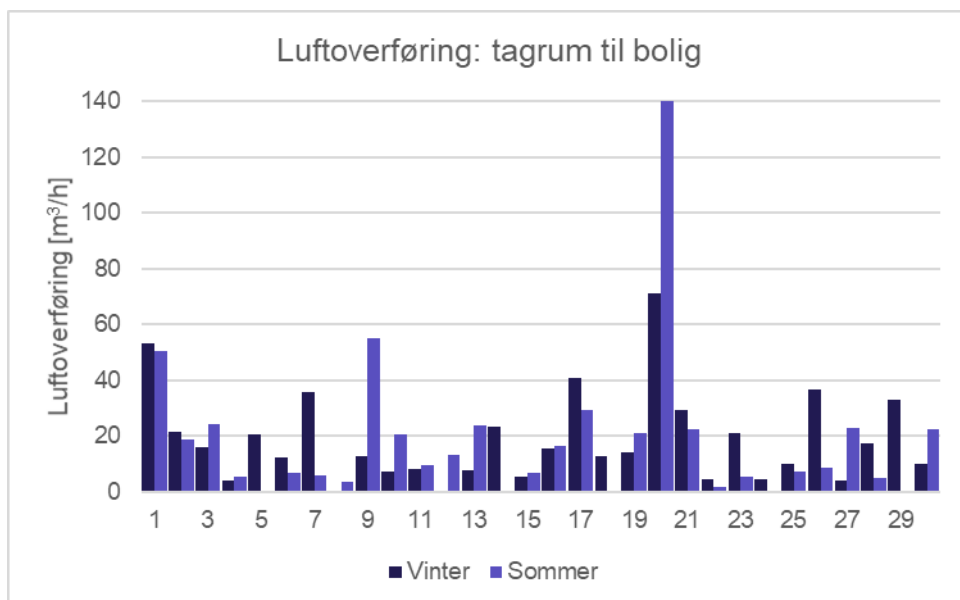


FIGUR 22. Netto luftudveksling mellem bolig- og tagrums-zone for de 30 huse. Grafen er udformet således, at positive værdier repræsenterer en opadgående luftoverføring (fra bolig til tagrum). Negative værdier repræsenterer en nedadgående luftoverføring (fra tagrum til bolig).

I figur 23 og figur 24 præsenteres luftoverføringen mellem de to zoner for de to måleperioder. Graferne viser den gennemsnitlige totale luftoverføring, der har været mellem de to zoner i måleperioderne. Graferne er opdelt således at figur 23 repræsenterer opadgående luftoverføring fra bolig til tagrum, mens figur 24 viser nedadgående luftoverføring fra tagrum til bolig. Det bemærkes, at hus 20 i sommerperioden har en nedadgående luftoverføring på $225 \text{ m}^3/\text{h}$. Det fremgår af figurene, at der i højere eller mindre grad forekommer luftudveksling igennem etageadskillelsen i begge retninger. Det gør sig gældende for både vinter-, og sommersæson.

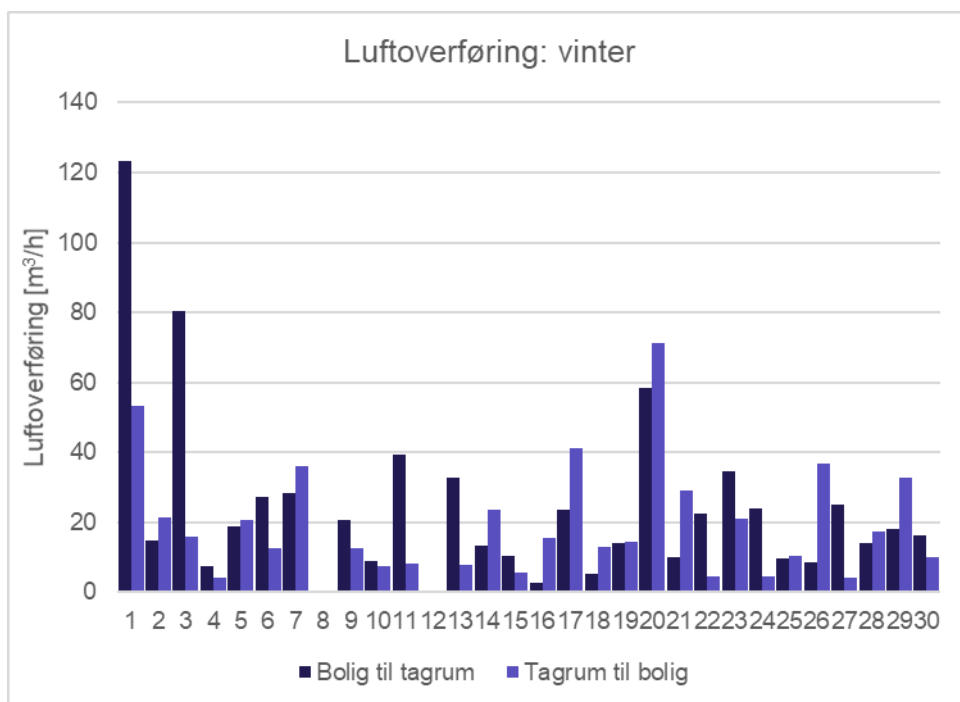


FIGUR 23. Opadgående luftoverføring fra bolig til tagrum.

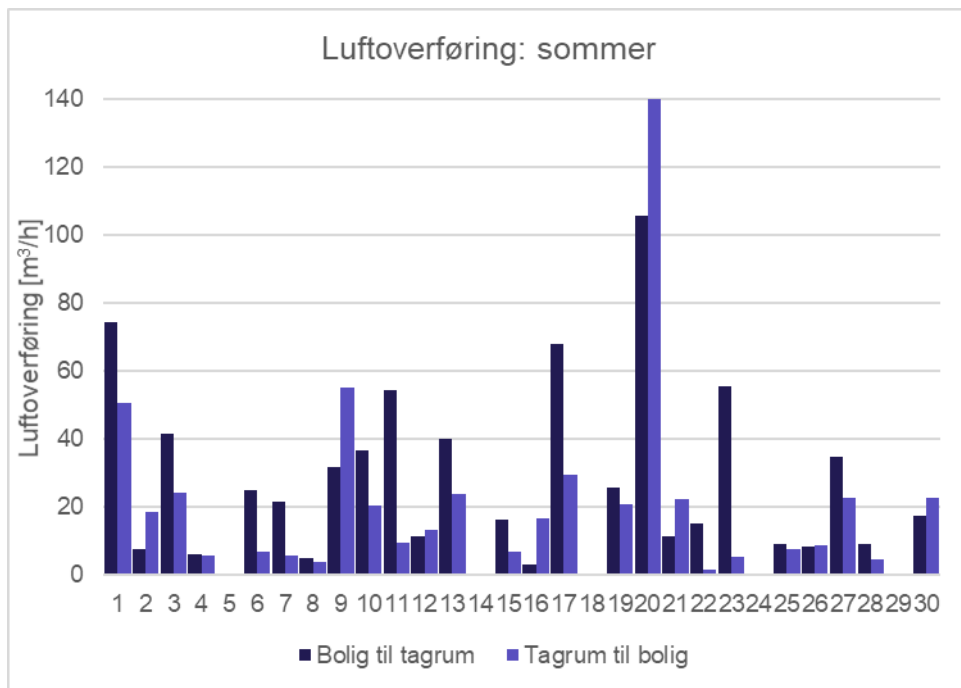


FIGUR 24. Nedadgående luftoverføring fra tagrum til bolig. Hus 20 opnår i sommerperioden en nedadgående luftoverføring på 225 m³/h.

Figur 25 og figur 26 angiver ligeledes den gennemsnitlige totale luftoverføring, der har været mellem de to zoner i måleperioderne. Disse figurer er opdelt efter måleperiodens sæson, således at figur 25 viser resultater fra vintermålingerne, og figur 26 fra sommermålingerne. Det fremgår igen, at luftoverføringen forekommer i begge retninger, og for begge sæsoner for alle husene. Desuden ses en relativt ligelig fordeling af huse med størst opadgående og nedadgående luftoverføring for både sommer og vinter.



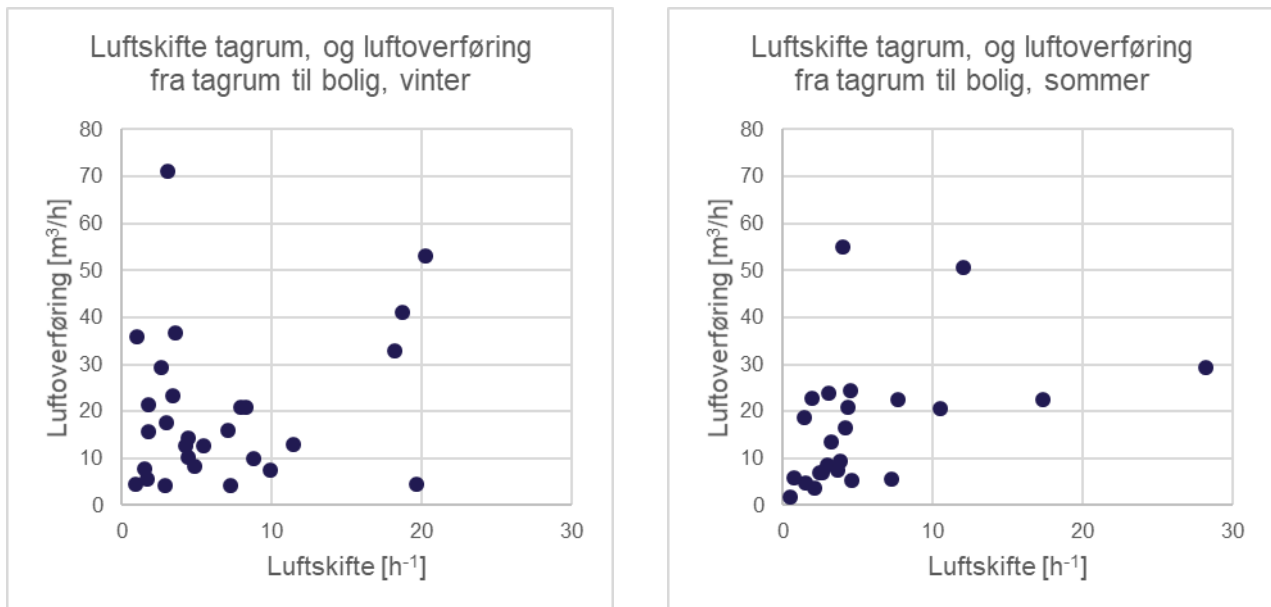
FIGUR 25. Luftoverføring mellem de to zoner om vinteren.



FIGUR 26. Luftoverføring mellem de to zoner om sommeren.

5.1.4 Luftoverføring som funktion af luftskiftet

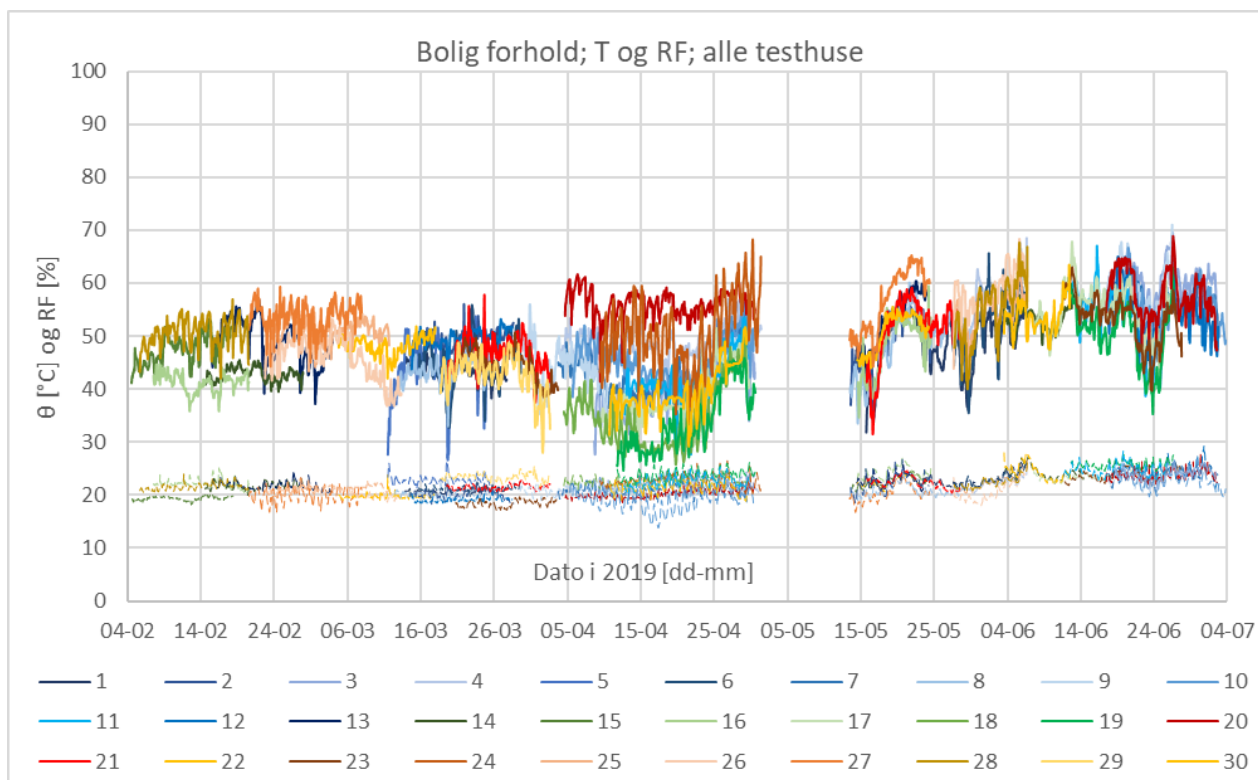
Det er undersøgt om luftoverføringen mellem de to zoner har en systematisk sammenhæng med luftskifterne i hhv. bolig og tagrum. På figur 27 præsenteres tagrummets luftskifte som funktion af den nedadgående luftoverføring for hhv. vinter og sommer. Der er ikke umiddelbart en tydelig sammenhæng mellem luftskiftet i tagrummet og den nedadgående luftoverføring. Der ses dog i mindre grad en større luftoverføring ved højere luftskifte i tagrummet. Lignende undersøgelser for sammenhængen mellem luftskifter og luftoverføring er udført for bolig luftskifter og opadgående luftoverføring. Disse præsenteres i bilag 9.3.



FIGUR 27. Luftoverføring fra tagrum til bolig som funktion af luftskifte i tagrummet for vinter (venstre) og sommer (højre).

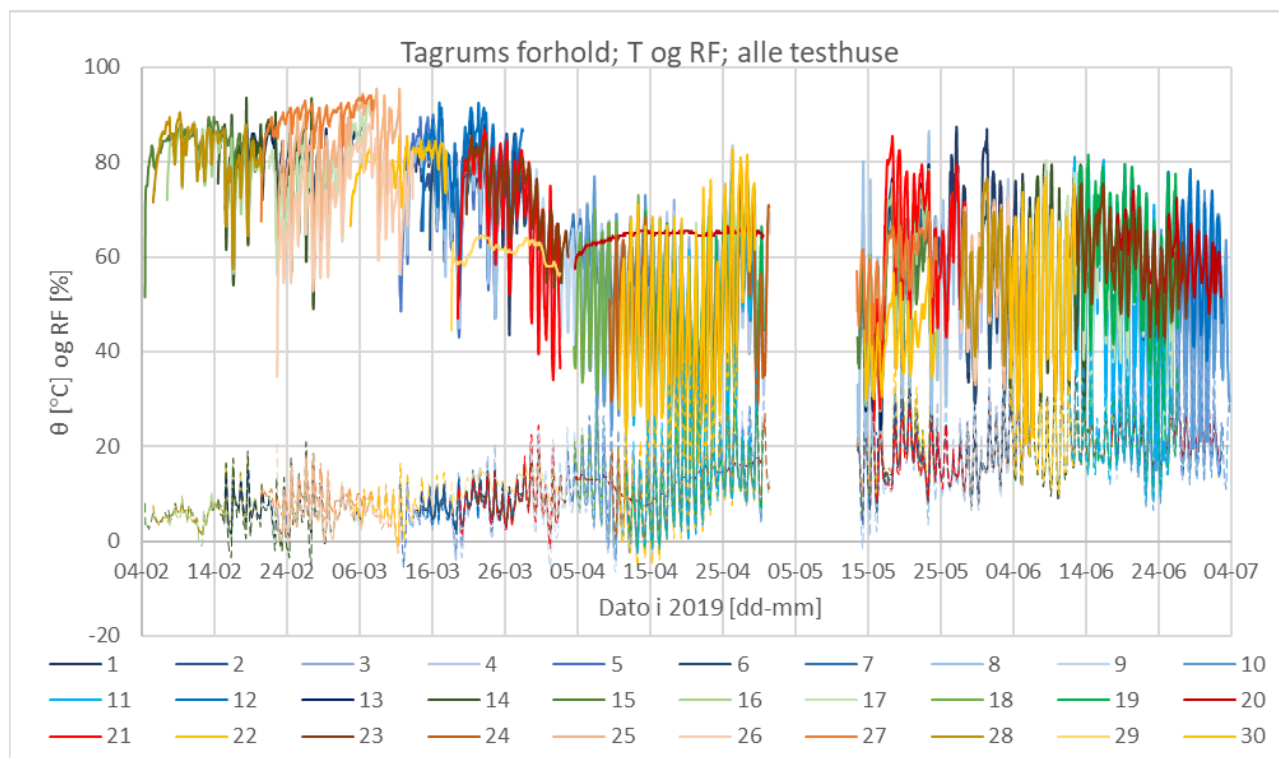
5.2 Temperatur- og fugtmålinger

De målte temperatur og relativ fugtighedsforhold i hhv. bolig, tagrum og udenfor præsenteres i figur 28, figur 29 og figur 30 som timebaserede værdier fra målingerne. De målte værdier opsummeres desuden som gennemsnitsværdier for de hhv. vinter og sommer målinger i tabel 8. Der tages forbehold for, at temperatur- og fugtighedsmålerene ikke har været særligt kalibreret, før eller efter målingerne i boliger og tagrum er foretaget. Det vurderes at de målte resultater giver et realistisk overblik over forholdene. Det ses, at temperaturen i boligerne er relativt konstant omkring 20° - en lille smule varmere om sommeren. Desuden ses, at den relative fugtighed i boligerne varierer mellem cirka 30-60 %, og generelt er en anelse højere om sommeren.



FIGUR 28. Temperatur og relativ fugtighed målt i boligerne. Blå/grønne farver repræsenterer huse med dampspærre, og rød/gul/orange farver repræsenterer huse uden dampspærre. Stiplede linjer viser temperatur, mens fuldoptrukne linjer repræsenterer relativ fugtighed.

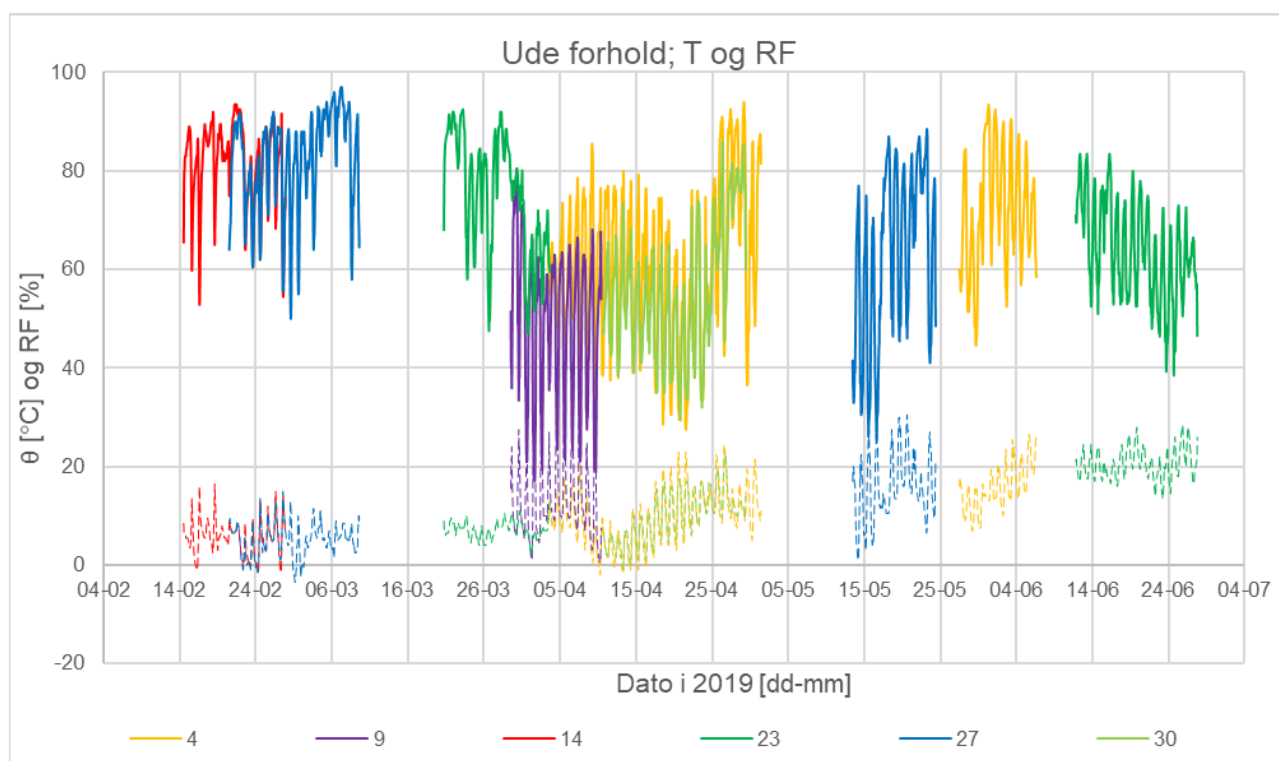
Temperatur- og relativ fugtighedsmålingerne i tagrummene viser både en stor daglig variation og en sæsonvariation i temperatur og relativ fugtighed. Det ses, at der om vinteren bliver koldt i tagrummene, ned til 0°, og at den relative fugtighed er over 80 %. Om sommeren falder den relative fugtighed, om end den stadig svinger op til 80 %. Temperaturen i tagrummene kan blive rigtig høj i dagtimerne om sommeren, men aftager om natten. Gennemsnitstemperaturen i tagrummene er omkring 20°C om sommeren. Målingerne af udeforholdene er afbildet på figur 30 og viser samme tendenser som i tagrummene dvs. koldere og fugtigere om vinteren.



FIGUR 29. Gennemsnits temperatur og relativ fugtighed målt i tagrummene. Blå/grønne farver repræsenterer huse med dampspærre, og rød/gul/orange farver repræsenterer huse uden dampspærre. Stiplede linjer er temperatur, mens fuldoptrukne linjer repræsenterer relativ fugtighed.

TABEL 8. Gennemsnitsværdier for temperaturer og relative fugtigheder i både bolig og tagrum, i vinter- og sommerperioder.

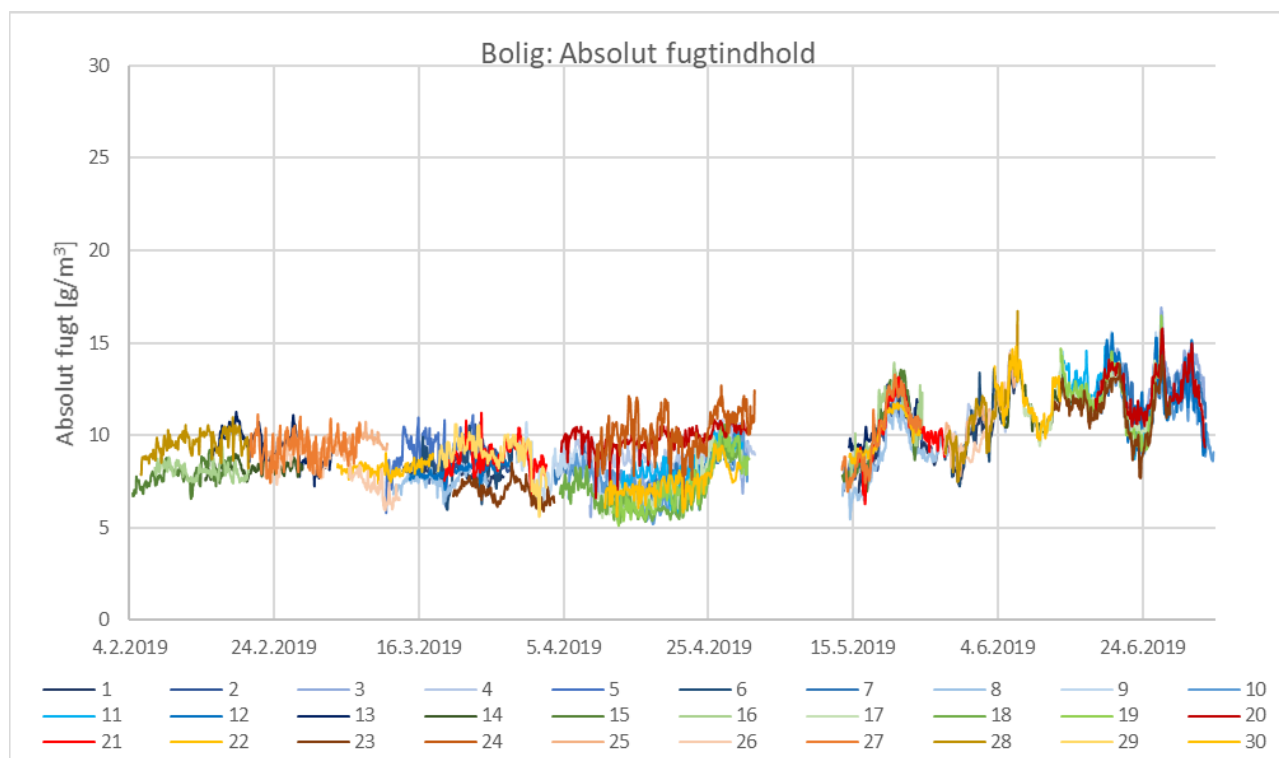
Hus	Bolig				Tagrum			
	Vinter		Sommer		Vinter		Sommer	
	θ [°C]	RF [%]	θ [°C]	RF [%]	θ [°C]	RF [%]	θ [°C]	RF [%]
1	20,8	43,2	22,9	48,8	7,7	76,7	18,6	59,3
2	20,2	49,3	22,4	48,5	7,9	74,5	18,6	54,3
3	22,1	40,9	23,9	60,5	12,3	50,9	25,2	48,7
4	20,9	48,6	22	56,6	12,6	51,7	21,4	52
5	22,9	44,9			6,7	75		
6	21,2	45,6	22,9	52,5	8,6	71,3	21,7	50,2
7	21	43,1	24,1	57	13,4	54,8	24,5	52,6
8	20,2	43,6	20,8	48,7	6,8	75,3	17,4	54,8
9	21,1	44,4	22,7	59,2	10	56,2	26,3	42,7
10	19	45,7	22,8	56	13,2	47,2	26,1	46,5
11	22,6	41,3	24,8	54,3	15,4	43,7	24,4	51,2
12	19,1	49,5	24,6	53,8	7,1	80,1	22,4	57
13	21,8	49	22,9	53,3	6,8	80,4	19,4	55
14	21,8	42,8	24,2	53,4	6,1	77,9	19,4	55
15	19,4	47,4	22,6	49,8	5,8	84,1	19	52
16	22,2	41,2	24,3	48,1	6	80,6	19	55
17	21,6	38,7	23,5	55,3	5,9	77,1	12,5	48
18	22,6	34,3			12,5	47,4		
19	23,9	33,8	25,8	49,9	12,5	50,6	22,1	58,6
20	20,1	56,2	23,7	58,1	12,8	64,5	21,9	59,8
21	21,5	46,9	22,4	51,7	8,7	69,9	16,6	63
22	19,8	48,2	22,5	50,9	7,4	79,5	23,2	43
23	18,4	44,3	23,8	53,2	8,8	72,9	22,1	59,8
24	22,7	50,6			14,2	46,9		
25	21,2	51,1	22,4	54,9	5,9	83,7	21,2	54,3
26	20,5	45,9	20,6	58,6	6,7	72,3	19,9	55
27	20	53,9	20,4	56,7	9,3	89,7	19,3	58,5
28	21,6	50,6	22,4	54,8	6,4	82	20,3	56
29	23,4	42,8			12,5	61,2		
30	21,4	39,6	24,4	53,6	13,9	46	23,9	50,1



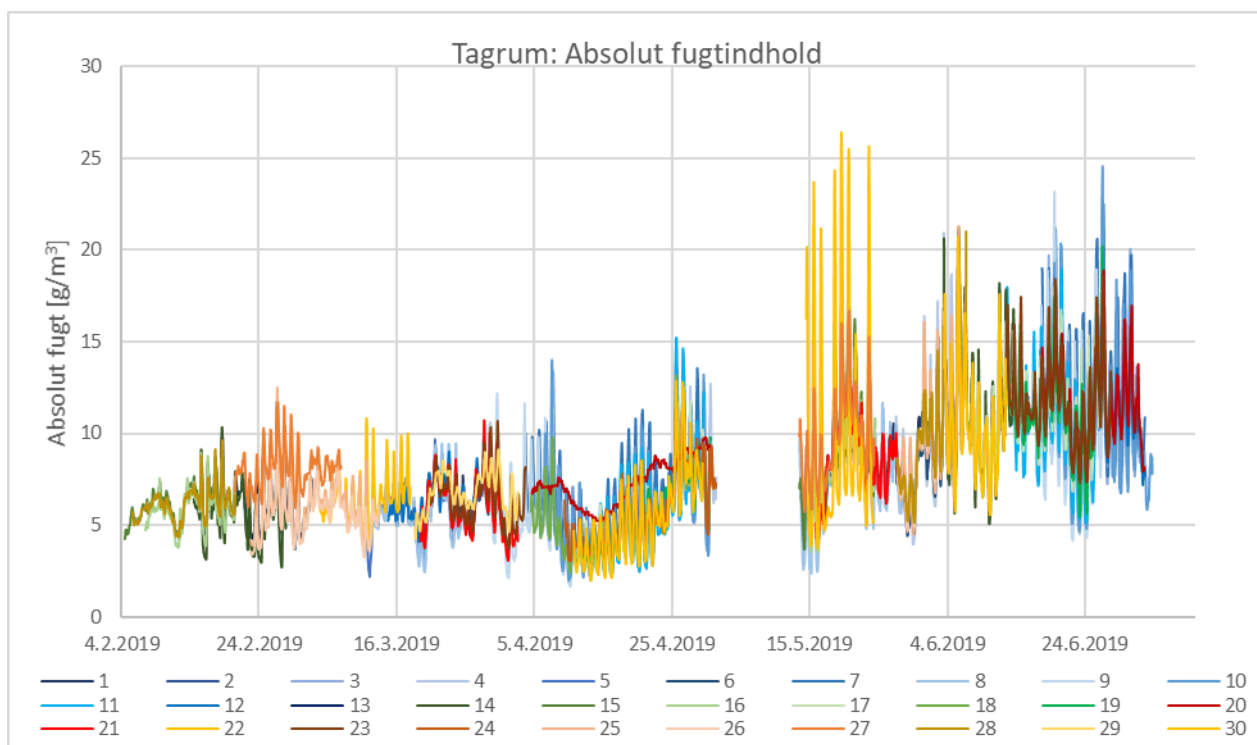
FIGUR 30. Udeforhold registreret med temperatur- og relativ fugtighedsloggere i huse 4, 9, 14, 23, 27 og 30. Temperatur registreringer præsenteres med stiplede linjer, og fuldt optrukne linjer repræsenterer relativ fugtighed.

5.2.1 Absolut fugtindhold og fugttilskud

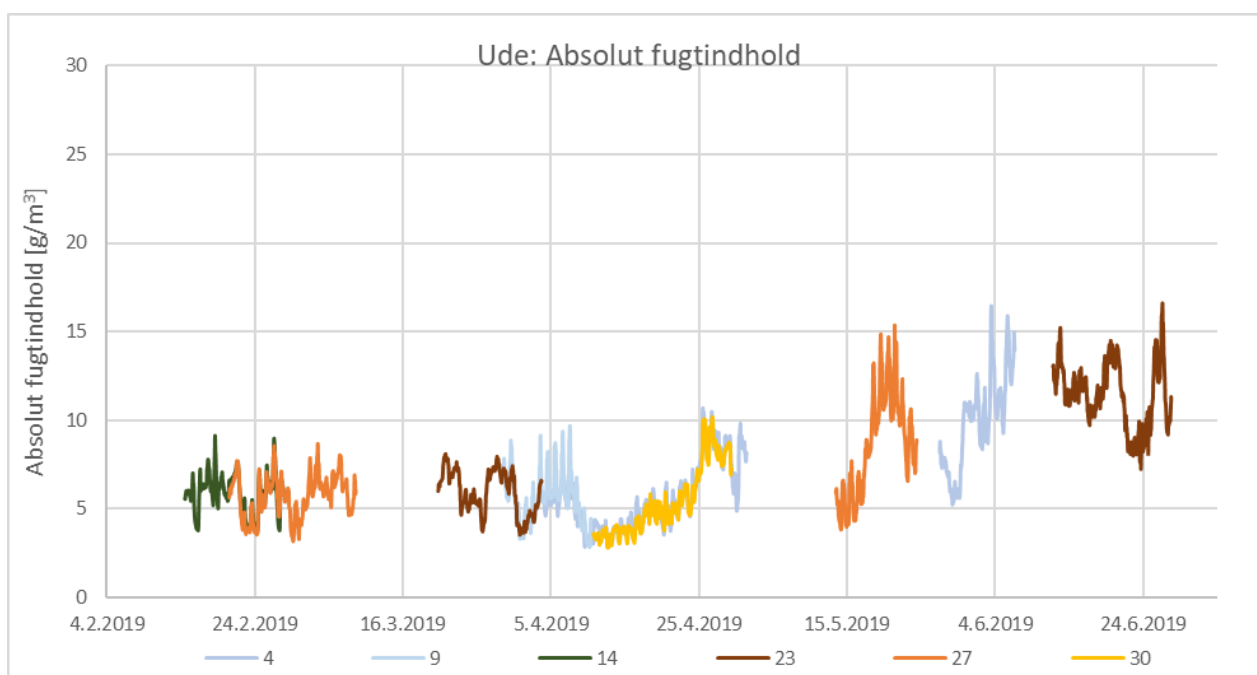
De målte værdier for temperatur og relativ fugtighed i de 30 huse omregnes til absolut fugtindhold, svarende til vanddampkoncentrationen, og præsenteres i hhv. figur 31 for bolig, figur 32 for tagrum, samt figur 33 for udeforhold. Det fremgår af figurerne, at det absolutte fugtindhold stiger om sommeren både i boliger og i tagrum, samt udenfor.



FIGUR 31. Absolut fugt i bolig-zonerne for de 30 huse i de respektive måleperioder.



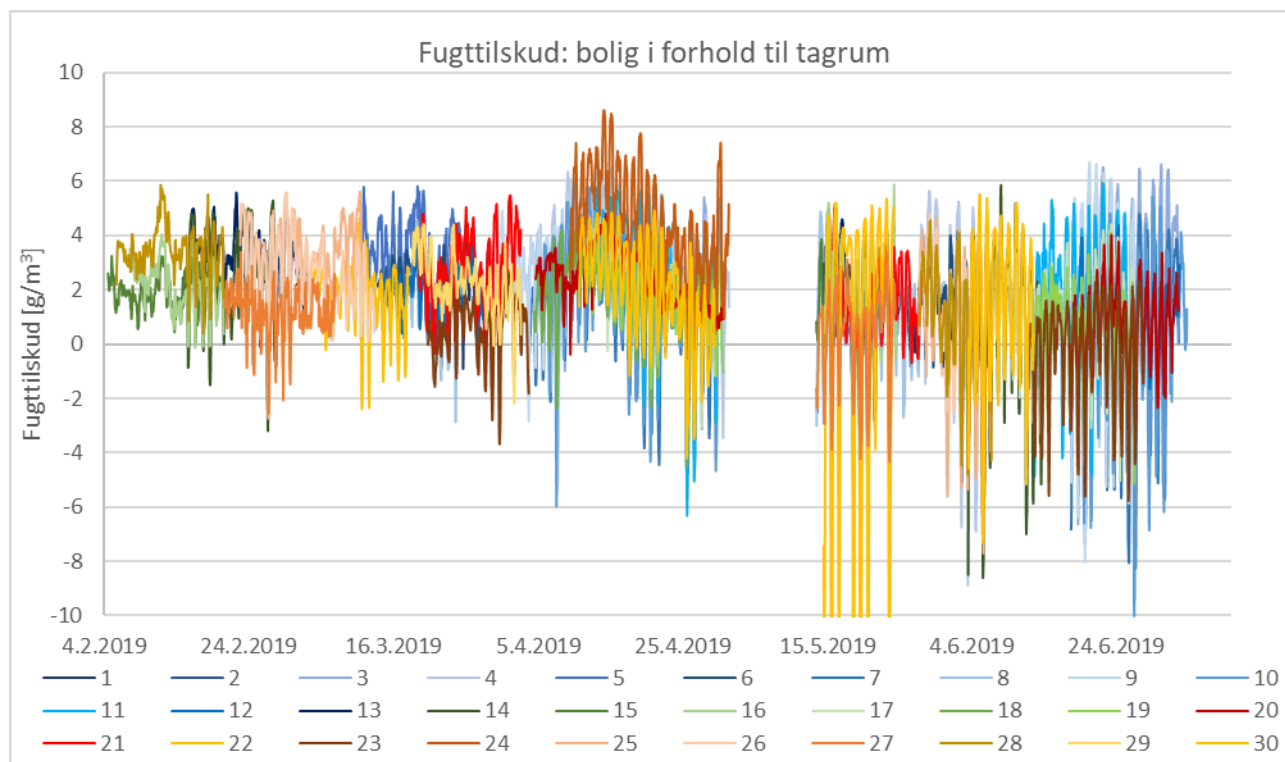
FIGUR 32. Absolut fugtindhold i tagrummene i de 30 huse for de respektive måleperioder.



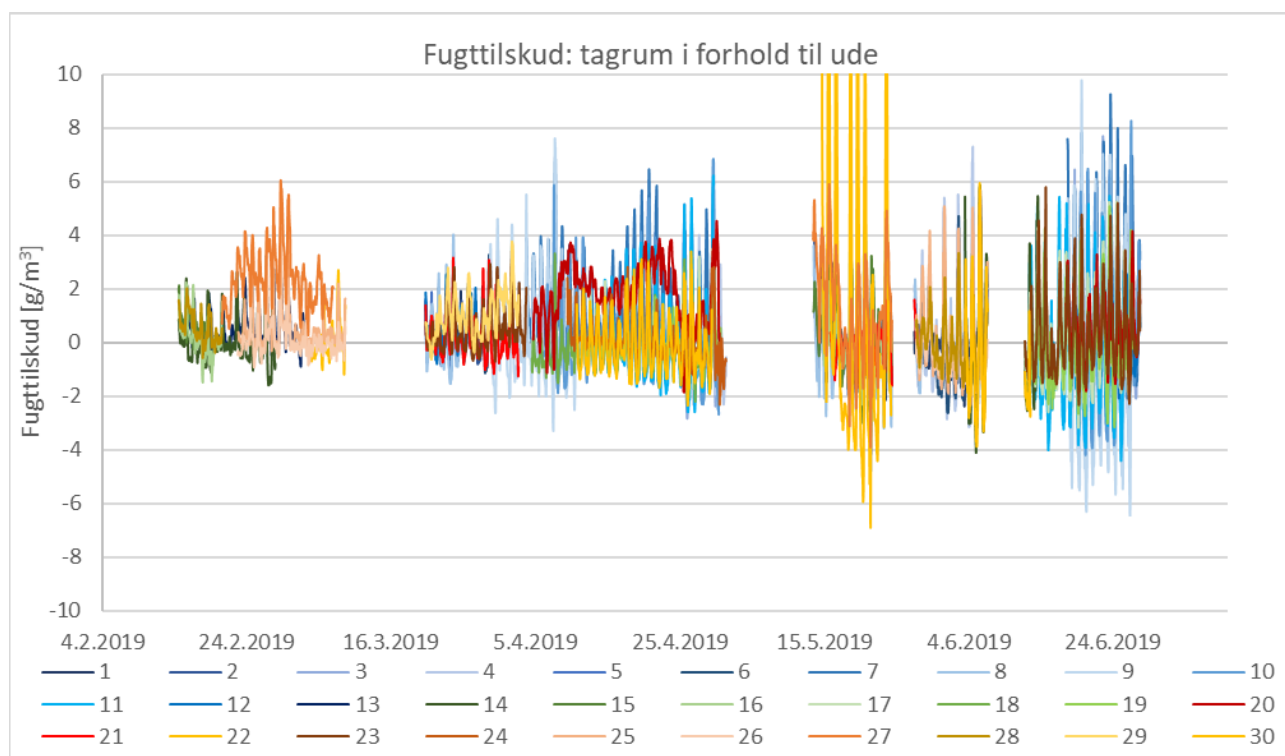
FIGUR 33. Absolut fugtindhold i udeforhold.

I de følgende grafer, figur 34, figur 35, figur 36 præsenteres fugttilskud i bolig i forhold til tagrum, og fugttilskud i hhv. tagrum og bolig i forhold til udeluft. Hensigten er at skabe bedre overblik over forskellene i vanddampkoncentrationen mellem de betragtede zoner. Farvepaletten tilsvare de tidligere figurer, hvor husene præsenteres enkeltvis, og blå/grønne farver repræsenterer huse med dampspærre, og rød/gul/orange farver repræsenterer huse uden

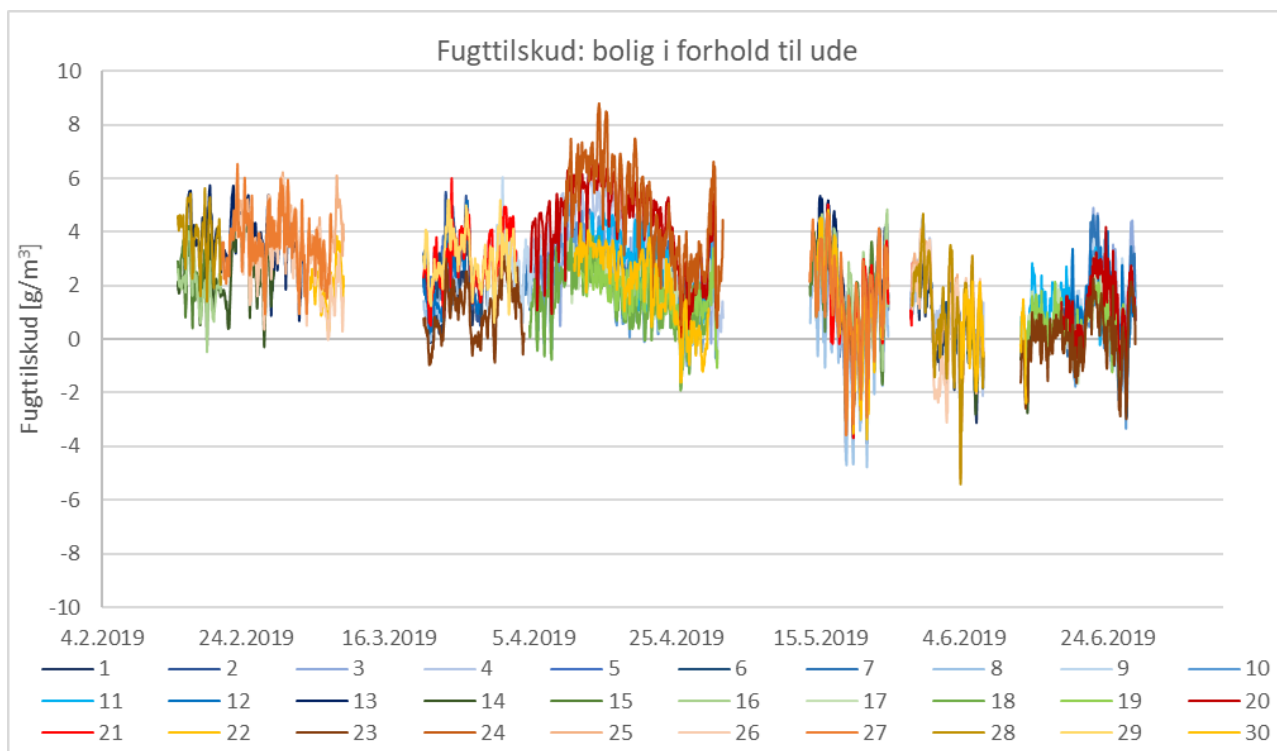
dampspærre. Fugttilskuddet er regnet som forskellen mellem det absolutte fugtindhold mellem henholdsvis bolig og tagrum, samt de to zoner og udenfor. Ved beregninger af fugttilskud til udeforhold, benyttes gennemsnitsværdier fra de forskellige lokationer for absolut fugtindhold i udeluften.



FIGUR 34. Fugttilskud i bolig i forhold til tagrum i løbet af måleperioden. Det bemærkes at enkelte målinger fra hus 22 viser fugttilskud ned til min. -15 g/m^3 .



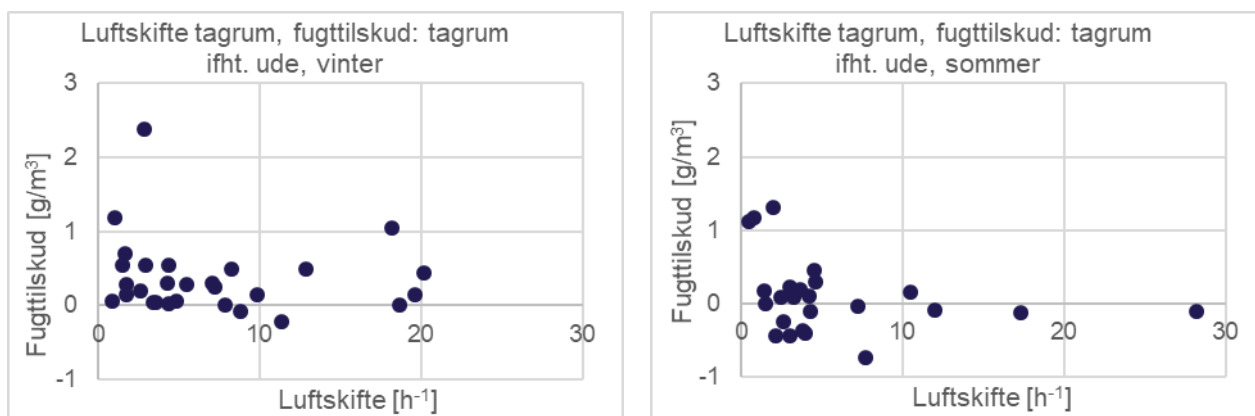
FIGUR 35. Fugttilskud itagrum i forhold til ude i løbet af måleperioden. Det bemærkes at enkelte målinger fra hus 22 viser fugttilskud op til 16 g/m^3 .



FIGUR 36. Fugttilskud i bolig i forhold til ude i løbet af måleperioden.

5.2.2 Fugttilskud som funktion af luftskiftet

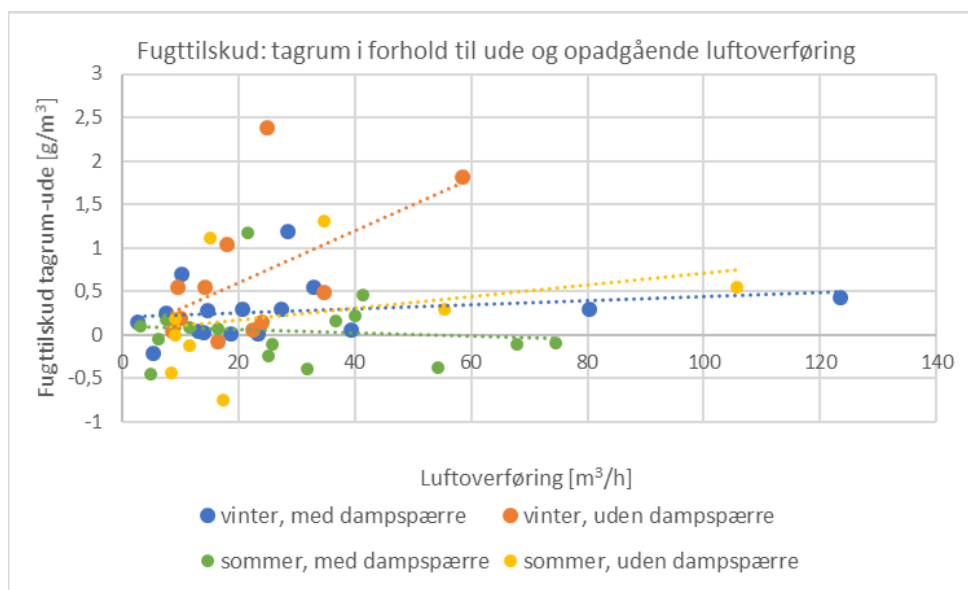
Det undersøges endvidere, om fugtforholdene i tagrummet har systematisk sammenhæng med luftskiftet i hhv. tagrummet og bolig, se figur 37. Derfor præsenteres det gennemsnitlige fugttilskud for tagrummet i forhold til ude som funktion af det gennemsnitlige luftskifte i tagrummet for hhv. vinter og sommer. I bilag 9.4 præsenteres ligeledes fugttilskuddet i boligerne som funktion af luftskifte i boligerne. Det ses på figurene, at luftskiftet ikke har nogen stor effekt på fugttilskuddet i tagrummet og slet ikke i boligen. Fugttilskuddet for tagrummet i forhold til ude falder med stigende luftskifte i tagrummet, hvilket reducerer det absolutte fugtindhold. Samtidigt ses der ingen sammenhæng for en stor del af husene, hvor fugttilskuddet både kan være meget lille og stort for relativt ens – og små – luftskifter. Højt fugttilskud med et lavt luftskifte i tagrummet kan være tegn på, at der er fugttransport fra boligen op til tagrum. Det fremgår desuden af figurene, at mange af loftrumene har udvist relativt små luftskifter ved målingerne – under 5 h^{-1} . Det er på baggrund af disse resultater ikke muligt at konstatere vinter/sommer afhængighed, og derfor synes ventilationsforholdene i tagrummene at afhænge primært af vind og vejrforhold.



FIGUR 37. Gennemsnitligt fugttilskud hhv. vinter og sommer for tagrummet i forhold til ude som funktion af gennemsnitligt luftskifte i tagrum

5.2.3 Fugttilskud som funktion af opadgående luftoverføring

For at kunne konstatere, hvorvidt høj opadrettet luftoverføring betyder øget fugttilførsel til tagrummet, skitseres den gennemsnitlige opadgående luftoverføring i forhold til det gennemsnitlige fugttilskud i tagrummet for hver bygning samt måleperiode, som præsenteret på figur 38. Tendenslinjerne indikerer, at der er en sammenhæng mellem tagrummenes fugttilskud i forhold til udeluften og den opadgående luftoverføring fra boligen: Fugttilskuddet stiger for stigende luftoverføring med undtagelse af sommerperioden i tilfælde med dampspærre. Tendensen er markant større om vinteren i tilfælde uden dampspærre. Det skal dog bemærkes at antallet af målinger er begrænset og derfor skal tendenserne blot ses som indikerende.



FIGUR 38. Gennemsnitligt fugttilskud i tagrum i forhold til ude som funktion af gennemsnitlig opadgående luftoverføring for de 30 huse i hhv. sommer og vinterperioder samt tendenslinjer. Huse med dampspærre præsenteres i blå/grøn, mens huse uden dampspærre præsenteres i gul/orange.

5.2.4 Skimmelvækst i tagrum

I forbindelse med opsætning af måleudstyr i husene, blev der konstateret synlig skimmelvækst på undertaget i 3 af de 30 testhuse. Det gælder husene 2, 7 og 25, som er afbildet på figur 39. Her ses tydelige markeringer af skimmelsvampevækst. Disse huse udviser ikke exceptionelt højt fugttilskud fra bolig eller udeforhold. Til gengæld udviser de alle lave luftskifter ($<5h^{-1}$) i tagrummet for begge sæsoner. Endvidere måles luftskifter under $2h^{-1}$ i tagrummene for hus 2 og 7 i begge måleperioder.



FIGUR 39. Billeder af skimmelvækst i tagrum.

DISKUSSION

6 DISKUSSION

I dette kapitel diskuteres de præsenterede måleresultater samlet i forhold til de opstillede hypoteser.

Generelt for målingerne bør det nævnes, at temperatur- og relativ fugtighedslogger ikke har været særskilt kalibreret i forbindelse med dette projekt. Derudover er målingerne i de 30 huse ikke udført i præcist samme perioder, og det er således ikke muligt at sammenligne husene direkte. Målingerne er heller ikke udført i hverken den koldeste vinterperiode eller i den varmeste sommerperiode. Der kan derfor godt være en vis sæsonafhængighed til stede, men det har ikke kunnet påvises i dette projekt. Nedenstående er således baseret på de opnåede resultater i form af gennemsnitsværdier for de respektive måleperioder.

6.1 Luftskifte i boliger og i tagrum

6.1.1 Bolig

For stort set alle huse gælder, at luftskiftet i boligen er større om sommeren end om vinteren. Dette er dog naturligt forekommende, da beboerne har tendens til flere åbne vinduer og døre, når det er varmt. Det gennemsnitlige luftskifte for alle boliger i denne undersøgelse er fundet til at være hhv. $0,20\text{h}^{-1}$ om vinteren, og $0,31\text{h}^{-1}$ om sommeren. Nogle huse; 4, 16 og 22 har samme luftskifte for begge sæsoner. Enkelte huse; 3 og 13, har dog udvist højere luftskifte i boligen om vinteren end om sommeren. Kun få huse, og kun i sommerperioden, lever op til kravet om grundluftskifte fra bygningsreglementet på $0,5\text{h}^{-1}$ i boligen. Dette gælder husene 1, 19, 23 og 17. Tidligere undersøgelser af klimaskærmens lufttæthed og luftskifte i boliger viser det samme billede: at tilførslen af udeluft oftest ikke lever op til bygningsreglementets krav, og at luftskiftet er meget afhængigt af brugeradfærd (Mortensen & Bergsøe, 2016).

Resultaterne viser, at boliger med dampspærre i loftet i gennemsnit har højere luftskifte end boliger uden dampspærre. Dette gælder for begge måleperioder. Dette kan skyldes, at der for nyere huse med dampspærre er taget hensyn til ventilationsforhold i projekteringen.

I ældre huse, hvor der er installeret dampspærre senere, har der i forbindelse med renovering måske også været sat fokus på at opretholde et tilstrækkeligt luftskifte. Derudover kan det konstateres, at tagrumstype d) udviser højere luftskifte i boligen, sammenlignet med tagrumstype a). Tagrumstype d) er generelt ældre boliger fra før 1950, og det kan antages, at den generelle lufttæthed i disse boliger er mindre end ved nyere byggeri, og den naturlige ventilation dermed er større.

Ydermere kan det konstateres, at der fandtes marginalt større luftskifter i boliger med mekanisk ventilation, omend disse boliger stadig ikke opfylder bygningsreglementets krav til grundluftskifte.

6.1.2 Tagrum

Luftskiftet i tagrummene varierer meget. Dette luftskifte formodes at være meget afhængigt af vejrforhold og især vindens hastighed og retning i forhold til husets orientering, og dermed forekommer de store variationer, som også fundet i (Møller, Morelli, & Hansen, 2019). De gennemsnitlige luftskifter i tagrummene er fundet til hhv. $6,7\text{h}^{-1}$ om vinteren, og $5,5\text{h}^{-1}$ om sommeren, men for begge er der stor standardafvigelse. Målingerne om vinteren varierer fra det mindste tagrumsluftskifte på $0,9\text{h}^{-1}$ om vinteren og $0,5\text{h}^{-1}$ om sommeren til $20,2\text{h}^{-1}$ om

vinteren og $28,2\text{h}^{-1}$ om sommeren. På baggrund af måleresultaterne kan det konstateres, at tagrumstype d) udviser betydeligt større luftskifter end tagrumstype a). Dette kan skyldes, at tagrumstype d) i alle disse tilfælde består af understrøgne teglsten uden undertag. I nogle af disse tagrum var der endvidere åbne tagvinduer, som bidrager til ventilationen. Der findes ingen anbefalinger til grundluftskifter i disse uudnyttede tagrum, men ventilationen bør være tilstrækkelig for at fjerne overskydende fugt. Dette skal fx sikres ved at have tilstrækkelige ventilationsåbninger, som angivet i (Brandt et al., 2019). Det fremgår netop af figur 37, at højere luftskifter i tagrummet ikke nødvendigvis medfører lavere fugttilskud i tagrummet i forhold til udeluften. Omvendt kan et lille luftskifte forøge risikoen for at fugt nedefra ikke fjernes tilstrækkeligt og der kan opstå forhold hvor fx skimmel begynder at vokse.

6.2 Retning af luftstrøm

Resultaterne fra målingerne i nærværende undersøgelse angiver tydeligt, hvordan luftudveksling mellem bolig og tagrum er i de undersøgte huse. Det er således påvist, at luftudvekslingen forekommer i begge retninger. Ligeledes kan det konstateres, at luftudvekslingen forekommer i både boliger med og uden dampspærre i loftskonstruktionen. Ved at betragte gennemsnitsværdier for luftudvekslingen for alle husene, tabel 7, kan det konstateres, at den opadgående luftoverføring fra bolig til tagrum er større end den nedadgående. Betragtes derimod de enkelte huse, som på figur 25 og figur 26, fremstår der et andet billede. Det fremgår af figur 25, at om vinteren, hvor der findes 28 valide målinger, dominerer opadgående luftoverføring i 14 huse (9/17 med dampspærre, 5/11 uden dampspærre), mens den nedadgående luftoverføring dominerer i de resterende 14 (8/17 med dampspærre og 6/11 uden dampspærre). I sommerperioden er der 25 valide målinger. Af figur 26, fremgår det, at den opadgående luftudveksling dominerer i 17 huse (12/16 med dampspærre, 6/9 uden dampspærre). Der kan således ikke konstateres en sæsonafhængig retning af luftudvekslingen. I forhold til nettoudvekslingen, afbildet på figur 22, fremgår det, at der er overvejende mere opadgående luftudveksling, især om vinteren. Ved betragtning af de absolutte værdier for nettoudvekslingen ses der ikke en signifikant forskel på de to sæsoner. Betragtes figur 21, kan det dog ses, at der er større opadgående end nedadgående luftoverføring om vinteren.

Ligeledes kan det konstateres, at tilstedeværelsen af en dampspærre ikke synes at have større betydning for luftudvekslingen. Det fremgår dog af tabel 7, at ved gennemsnitsbetragtninger, er mængden af nedadgående udveksling mindre i tilfælde med dampspærre. I forhold til tagkonstruktionstyperne, kan det konstateres, at den gennemsnitlige udveksling i begge retninger er højere i type d) sammenlignet med type a). Endvidere kan det konstateres at for tagrumstype a), er der højere opadgående luftudveksling end nedadgående, for begge sæsoner. I huse uden mekanisk ventilation konstateres mere opadgående luftstrøm for begge sæsoner, mens der for huse med mekanisk ventilation tydeligt er mest opadgående luftoverføring om sommeren, og nedadgående om vinteren. I forhold til typen af isoleringsmaterialer, er dataene begrænset, da kun 3 huse har cellulosebaseret isolering udlagt på original mineraluld. For et af disse huse udgik vintermålingen, og for et andet af disse huse ville beboerne ikke deltage i sommer-målingen. Der findes derfor kun målinger fra to huse pr. sæson. Af disse målinger fremgår det, at den nedadgående luftoverføring er størst for begge sæsoner.

Ved at betragte Tabel 4 og figur 23 kan det konstateres at følgende huse har høj luftoverføring ($>20\text{m}^3/\text{h}$) fra bolig-zonen til tagrummet om vinteren; 1, 3, 6, 7, 9, 11, 13, 17, 20, 22, 23, 24, og 27. For sommeren gælder at følgende: 1, 3, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 17, 19, 20, 23, og 27 har en høj luftoverføring ($>20\text{m}^3/\text{h}$) fra bolig til tagrum. Således fremgår det tydeligt, at den opadgående luftoverføring forekommer både i huse med og uden dampspærre, samt

i gamle såvel som nyere huse. Dette gælder både om sommeren og om vinteren. Om omfanget af den opadgående luftoverføring - over eller under $20\text{m}^3/\text{h}$ - har betydning for fugtforholdene i tagrum, er opstillet i grafer, der præsenteres i bilag 9.2. Det fremgår heraf, at der er fugttilskud i stort set alle tagrum i forhold til udeluften i daglig variation. I de fleste tilfælde falder den absolutte fugt i tagrummet dog ned til eller under den absolutte fugt i udeluften om natten. Der er to undtagelser; hhv. hus 20 og hus 27, hvor fugttilskuddet således forbliver højere hele døgnet. Dette gælder umiddelbart kun for vinterperioden.

6.3 Betydning af membraner

I forhold til udvekslingen mellem de to zoner kan det på baggrund af disse målinger konstateres, at den opadgående luftoverføring i vinterperioden faktisk er højere i huse med dampspærre. Dette kan igen muligvis forklares med, at loftet ikke er udført lufttæt, hvis man har stølet for meget på membranens virke. Om sommeren findes den opadgående luftoverføring for huse både med og uden dampspærre til at være i samme størrelsesorden. Til gengæld ses det, at den nedadgående luftoverføring fra tagrum til bolig er højere i huse uden dampspærre. Dette gør sig særlig gældende i sommerperioden, hvor resultaterne viser næsten dobbelt så stor overføring fra tagrum til bolig i huse uden dampspærre i forhold til huse med dampspærre. Dette understreger vigtigheden af en tæt dampspærre. Det er også denne nedadgående luftoverførsel, der kan overføre skimmelsporer (og dermed sundhedsrisici) til boligen. Det ses, at luftskiftet i tagrummet er større om sommeren i huse med dampspærre. Dampspærren sørger umiddelbart for, at den nedadgående luftoverføring begrænses, således at ventilationen af tagrummet med udeluften dominerer.

6.4 Betydning af fugttilførsel fra indeklimaet

I de perioder, hvor tagrummets absolutte fugt overstiger den absolutte fugt udendørs, får tagrummet fugttilskud i forhold til forholdene udenfor. Det samme gælder boligen. Desuden yder boligen også fugttilskud til tagrummet. Fugttilskuddene fremgår af figur 34, figur 35, og figur 36, hvor det ses, at der for alle perioder findes fugttilskud i tagrummet sammenlignet med udenfor, og at der ligeledes er fugttilskud i tagrum i forhold til bolig for hele måleperioden.

Fugttilskuddet i boligerne er højere end i tagrummet i de koldere perioder. Det fremgår, at der for vinterperioden er et fugttilskud i boligerne på $2\text{-}4\text{g}/\text{m}^3$ i forhold til udeluften. Om sommeren er der ikke umiddelbart fugttilførsel, da forholdene er lig de udendørs forhold. Dette hænger sammen med det større luftskifte i boligerne, der forekommer om sommeren. Derudover kan det konstateres, at fugttilskuddet i tagrummet i forhold til udeluften i alle huse varierer fra positiv til negativ på daglig basis. Der er to tilfælde, huse 20 og 27, som har positiv fugttilskud i hele den kolde måleperiode. I sommerperioden viser disse to samme tendenser som de resterende huse.

Husene 20 og 27 skiller sig begge lidt ud fra de resterende huse. Hus 20 er en gammel præstegård fra 1719 med et enormt tagrum i to etager. Beboeren gør opmærksom på, at huset er meget fugtigt, og at der er problemer med grundfugt. Det fremgår af målinger (figur 28 og figur 29), at huset er fugtigere end de andre huse, og uden samme daglige variation. Ved første kontakt med beboer i hus 27 gør denne opmærksom på, at huset er under renovering, og der ingen loftlister er på måletidspunktet. Beboeren antog også, at loftet ville være utæt.

Ved at betragte figur 38, som sammenholder fugttilskuddet i tagrummet i forhold til ude med opadrettet luftoverføring, fremgår det, at højere luftoverføring fra bolig-zonen medfører

højere fugttilskud i tagrummet, og at dette tilskud er mærkbart større for huse uden dampspærre under vinterforhold.

6.5 Skimmeleksponering

Som det fremgår af figur 39, var der synlig skimmelvækst i tre huse; 2, 7 og 25. I disse tagrum er der målt relativt lave luftskifter, på under 5h^{-1} , og i to af dem endvidere under 2h^{-1} , hvilket er meget lavt. Der findes enkelte andre huse, hvor luftskiftet i tagrummet er under 2h^{-1} for én (13, 15, 16, 27, 29) eller begge (22) måleperioder. Disse har dog ikke udvist tegn på synlig skimmelvækst. Den absolutte fugt i tagrummet for disse huse skiller sig dog ikke yderligere ud end de resterende huse, med undtagelse af hus 27, som udviser større fugttilskud i forhold til udeforholdene for begge måleperioder.

Undersøgelsen har konstateret, at luftudvekslingen mellem bolig og tagrum forekommer i begge retninger for alle huse, og i begge sæsoner. Det er derfor nærliggende at antage, at ved skimmelvækst i tagrummet, kan boligens beboere eksponeres for skimmelsvampe eller skimmelsvampesporer. Eksponeringen kan have helbredsmæssige konsekvenser for mennesker, herunder hovedpine, irriterede luftveje, træthed, koncentrationsbesvær eller endda astma (Knudsen, Gunnarsen, & Madsen, 2017; "Skimmel.dk," n.d.).

For alle tre huse med synlig skimmelvækst i tagrummet gælder det, at den nedadgående luftoverføring er størst om vinteren, men til stede i begge sæsoner. For hus 7 er udvekslingen dog meget lille; under $5\text{ m}^3/\text{h}$ for begge sæsoner. For de to andre huse dog noget højere. I hus 2 er den nedadgående udveksling omkring $20\text{ m}^3/\text{h}$ for begge sæsoner, mens der i hus 7 findes en nedadgående luftoverføring på $36\text{ m}^3/\text{h}$ om vinteren, mens den er væsentligt lavere om sommeren ($6\text{ m}^3/\text{h}$). Målinger af relativ fugtighed i tagrummene har endvidere vist, at der i tagrum 25 er meget høj relativ fugtighed om vinteren. Målingerne er foretaget 24/2-11/3 med en gennemsnitlig relativ fugtighed på 84 %, og et maksimum på omkring 96 %. Skimmelvækst kan forventes at initieres allerede ved 75 % relativ fugtighed, men væksten vil være begrænset ved lavere temperaturer. Det er alligevel afgørende, at den relative fugtighed kan holdes nede for at undgå forhold, der er gunstige for skimmelvækst. Målingerne i huse 2 og 7 er foretaget lidt senere på året, hhv. 14/3-28/3 for hus 2, og 3/4 til 29/4 for hus 7. Da der var begyndende forår og varmere temperaturer, kan der af resultaterne ikke aflæses lige så høje relative fugtigheder som i hus 25, men for hus 2 er den gennemsnitlige relative fugtighed i måleperioden på 75 %, med et maksimum på 82 %. Om sommeren udviser ingen af disse ekstraordinært høj relativ fugtighed, men alle tre holder sig på 52-55 % i gennemsnit, dog med maksimum omkring 75 % for husene 2 og 25.

I denne nærværende undersøgelse er der ikke undersøgt, om der er sammenhæng mellem det konstaterede skimmelvækst i tagrum, den målte nedadgående luftoverføring og forekomsten af skimmelsporer i boligen. De beskrevne resultater understreger imidlertid vigtigheden af et lufttæt loft, så eventuel eksponering i boliger for skimmel fra tagrum minimeres. Et tidligere studie har påvist, at lufthastigheden på overfladen af gipsplader havde afgørende betydning for spredningen af skimmelpartikler og dermed eksponeringen (Knudsen et al., 2017). Den nærværende undersøgelse har derfor også vist, at der i et ventileret tagrum eksisterer ventilationsforhold, der bidrager til at eventuelle skimmelsporer frigøres og kan overføres til indeluften, hvis loftet er utæt. Samtidigt er god ventilation af tagrum med udeluft afgørende for reduktion af skimmelrisiko.

6.6 Diskussion i forhold til hypoteser

Hypotesen om, at der sker lufttransport gennem en loftkonstruktion, og at denne kan gå såvel op som ned, kan bekræftes. Der er konstateret luftudveksling i begge retninger i alle huse, såvel sommer som vinter. Det var derimod ikke muligt at påvise hypotesen om, at retningen på denne luftudveksling var årstidsafhængig. Først og fremmest fordi målingerne ikke er udført i karakteristiske vinter/sommer perioder.

Sammenhængen mellem den opadrettede luftoverføring og forskelle i det absolutte fugtindhold i tagrummene og i boligen er illustreret på figur 38, og det kan konstateres, at en højere opadrettet luftoverføring fører til stigende fugtindhold i tagrummet. Hypotesen om at opadrettet lufttransport medfører øget fugttilførsel i uudnyttede, uopvarmede tagrum kan dermed ikke afvises.

Den tredje angivne hypotese kan ikke afgøres af dette projekt. Hypotesen antog, at de hygroskopiske egenskaber af materialer i tagrummet, herunder isoleringsmaterialet, havde betydning for fugtforholdene i luften af tagrummet. Denne undersøgelse inkluderer desværre kun 3 huse med cellulosebaseret isolering. Derimod har lignende studier påvist, at isoleringsmateriale (og tykkelse og dampspærre) er af mindre betydning for uopvarmede tagrums fugtforhold, og at ventilation i tagrummet er den afgørende faktor (Hansen & Møller, 2019; Hansen & Møller, 2017).

KONKLUSION

7 KONKLUSION

I forhold til de angivne hypoteser, kan følgende konkluderes;

- Der forekommer luftudveksling igennem loftskonstruktioner mellem bolig og uudnyttede og uopvarmede tagrum. Luftudvekslingen forekommer i begge retninger.
- Opadrettet luftoverføring fra bolig til tagrum medfører forhøjede fugtforhold i uudnyttede, uopvarmede tagrum.
- Betydningen af de hygroskopiske egenskaber af isoleringsmaterialer i tagrummet kan ikke afgøres på baggrund af denne undersøgelse.

Ved at betragte gennemsnitlige værdier for luftudvekslingen i alle testhuse, på nær et enkelt ekstremt tilfælde, kan der konstateres at opadgående luftoverføring dominerer resultaterne. Det kan på baggrund af denne undersøgelse ikke afgøres, hvorvidt luftudvekslingen mellem zonerne er sæsonafhængig, da måleperioderne ikke er helt repræsentative for de koldeste hhv. de varmeste perioder. Der kunne heller ikke konstateres at dampspærren havde nogen klar betydning for omfanget og retning af luftudvekslingen.

Det konstateres også, at ingen af de inkluderede testhuse lever op til bygningsreglementets krav om luftskifte i boliger i vinterperiode, og at kun 4 af de undersøgte 30 huse lever op til kravet i sommerperioden (ud af 25 valide målinger i sommerperioden). Luftskifterne i tagrummene blev målt til at have stor variation, og der blev fundet større luftskifter i tagrumstype d) sammenlignet med tagrumstype a).

Der blev konstateret synlig skimmelvækst i 3 af de 30 tagrum. Disse tagrum havde alle relativt lave luftskifter, på under $5h^{-1}$. Dog findes samme eller lavere luftskifter i flere tagrum, som ikke udviste synlig skimmelvækst. Baseret på gennemsnitsværdier, ses der ingen sammenhæng mellem luftskifte i tagrum og absolut fugtindhold. Derimod kan det konstateres, at større opadgående luftoverføring medfører højere fugtindhold i tagrum.

Den nærværende undersøgelse har derfor også vist, at en god ventilation af tagrum med udeluft er afgørende for reduktion af skimmelrisiko. Derimod blev der ikke undersøgt, om der er sammenhæng mellem det konstaterede skimmelvækst i tagrum, den målte nedadgående luftoverføring og forekomsten af skimmelsporer i boligen. De nærværende resultater understreger imidlertid vigtigheden af et lufttæt loft, så eventuel eksponering til skimmel fra tagrum minimeres.

REFERENCER

8 REFERENCER

- Airaksinen, M., Pasanen, P., Kurnitski, J., & Seppänen, O. (2004). Microbial contamination of indoor air due to leakages from crawl space: A field study. *Indoor Air*, 14(1), 55–64. <https://doi.org/10.1046/j.1600-0668.2003.00210.x>
- Bergsøe, N. C. (1992). *Passiv sporgasmetode til ventilationsundersøgelser - Beskrivelse og analyse af PFT-metoden. SBI-rapport 227*. Hørsholm.
- Bjerregaard, E., & Nielsen, F. (1981). *Vindmiljø omkring bygninger - SBI-anvisning 128*. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut. Retrieved from [http://vbn.aau.dk/da/publications/id\(df3a80-165d-11dc-a5a4-000ea68e967b\).html](http://vbn.aau.dk/da/publications/id(df3a80-165d-11dc-a5a4-000ea68e967b).html)
- Brandt, E., Bunch-Nielsen, T., Christensen, G., Gudum, C., Hjorslev Hansen, M., & Møller, E. B. (2009). *SBI-anvisning 224: Fugt i bygninger*. (L. L. Beck Raunkjær, Ed.) (2nd ed.). Copenhagen, Denmark: Danish Building Research Institute.
- Brandt, E., Bunch-Nielsen, T., & Morelli, M. (2019). *SBI-anvisning 273: Tæge; Materialer, egenskaber, detaljer*. (N. Samsø Nielsen, Ed.). Copenhagen, Denmark: Danish Building Research Institute.
- Dietz, R. N., & Cote, E. A. (1982). Air infiltration measurements in a home using a convenient perfluorocarbon tracer technique. *Environment International*, 8(1–6), 419–433. [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(82\)90060-5](https://doi.org/10.1016/0160-4120(82)90060-5)
- Du, L., Batterman, S., Godwin, C., Rowe, Z., & Chin, J. Y. (2015). Air exchange rates and migration of VOCs in basements and residences. *Indoor Air*, 25(6), 598–609. <https://doi.org/10.1111/ina.12178>
- Energistyrelsen, S. d. (n.d.). Isolering af loft. Retrieved February 7, 2020, from <https://sparenergi.dk/forbruger/vaerktoejer/energiloesninger/isolering-af-loft>
- Feldt Jensen, N., Bjarløv, S. P., Johnston, C. J., Pold, C. F. H., Hjorslev Hansen, M., & Peuhkuri, R. H. (2019). Hygrothermal assessment of north-facing, cold attic spaces under the eaves with varying structural roof scenarios. *Journal of Building Physics*. <https://doi.org/10.1177/1744259119891753>
- Geving, S., & Thue, J. V. (2002). *Fukt i bygninger*. (I. C. Sandberg & E. Vercoe, Eds.). Oslo, Norway: Norges byggforskningsinstitut 2002.
- Gravesen, S., Nielsen, P. A., & Fog Nielsen, K. (1997). *Skimmelsvampe i vandskadede bygninger. SBI-rapport 282*. Hørsholm, Denmark. Retrieved from <https://sbi.dk/Assets/Skimmelsvampe-i-vandskadede-bygninger/978-87-563-0960-8.pdf>
- Hagentoft, C.-E., & Kalagasidis, A. S. (2014). Moisture safe cold attics - Assessment based on risk analyses of performance and cost. In *Proceedings of 10th Nordic Symposium on Building Physics* (pp. 1366–1373).
- Hansen, T., & Moeller, E. B. (2019). Hygrothermal performance of cold ventilated attics above different horizontal ceiling constructions – Field survey. *Building and Environment*, 165(August), 106380. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106380>
- Hansen, T., & Møller, E. B. (2016a). Field Measurements of Moisture in Cold Ventilating Attics with Different Types of Insulation Materials and Vapor Barrier. In *Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XIII* (p. 13). Atlanta, USA.
- Hansen, T., & Møller, E. B. (2016b). Full scale laboratory test building for examining moisture penetration through different ceilings. In K. Kielsgaard Hansen, C. Rode, & L.-O. Nilsson (Eds.), *Proceedings of the International RILEM Conference - Materials, Systems and Structures in Civil Engineering 2016. Segment on Moisture in Materials and Structures* (pp. 59–68). Lyngby, Denmark: RILEM Publications S.A.R.L.
- Hansen, T., & Møller, E. B. (2017). Field measurements of moisture variation in cold ventilated attics with different ceiling constructions. *Energy Procedia*, 132, 801–806. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.023>
- Hansen, T., & Møller, E. B. (2018). Measurements of Temperature Dependency on Thermal Insulation Thickness in Ventilating Attics. In *7th international Building Physics Conference, IBPC2018*. Syracuse, New York, USA.

- Hansen, T., Møller, E. B., & Tvedebrink, T. (2019). Hygrothermal performance of cold ventilated attics above different horizontal ceiling constructions: Full-scale test building. *Journal of Building Physics*. <https://doi.org/10.1177/1744259119894028>
- Jensen, J. O., Bräuner, E., Gram-Hanssen, K., Røhder Hansen, A., Norvig Larsen, J., & Stensgaard, A. G. (2016). *Parcelhusatlas: En kortlægning af danske parcelhuse og deres ejere sbi rapport 2016:16*.
- Kalamees, T., Kurnitski, J., Jokisalo, J., Eskola, L., Jokiranta, K., & Vinha, J. (2007). Air pressure conditions in Finnish residences. In *Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors* (Vol. 2, pp. 6–13).
- Knudsen, S. M., Gunnarsen, L., & Madsen, A. M. (2017). Airborne fungal species associated with mouldy and non-mouldy buildings e effects of air change rates , humidity , and air velocity. *Building and Environment*, 122, 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.06.017>
- Møller, E. B., Morelli, M., & Hansen, T. (2019). Air change rate in ventilated attics – reality and input for simulations. In *4th Central European Symposium on Building Physics* (Vol. 282). MATEC Web of Conferences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928202073>
- Møller, E., & Gunnarsen, L. (2012). *Midlertidig skimmelreivering af krybekældre - Undersøgelse af effekten af affugtning og sug i krybekældre med skimmelsvamp*. Hørsholm, Denmark.
- Mortensen, L. H., & Bergsøe, N. C. (2016). *Tæthed af klimaskærmen i eksisterende boliger, SBI 2016:17*.
- Mosley, R. B., Greenwell, D. J., Sparks, L. E., Guo, Z., Tucker, W. G., Fortmann, R., & Whitfield, C. (2001). Penetration of Ambient Fine Particles into the Indoor Environment. *Aerosol Science and Technology*, 34(1), 127–136. <https://doi.org/10.1080/02786820117449>
- Noreng, K. (1995). *Dampsperrer i tak - Prosjektrapport 190-1995*. Oslo, Norway: Norges byggforskningsinstitutt. Retrieved from file:///sbi.aau.dk/Users/tkh/Downloads/V__INFO_PUB_Utgivelser_Prosjektrapport_Byggforsk_prosjektrapporter_160-236_pr190_netto_Prosjektrapport190.pdf
- Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J., & Salminen, K. (2010). Mold growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials. In *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI- 11th International Conference*. Clearwater Beach, Florida: ASHRAE.
- Pedersen, C., de Place Hansen, E. J., Hjorslev Hansen, M., & Marsh, R. (2003). *SBI-anvisning 207: Anvendelse af alternative isoleringsmaterialer (1.)*. Hørsholm, Denmark: Byg og Byg, Statens Byggeforskningsinstitut.
- Rode, C., & Peuhkuri, R. (2006). The Concept of Moisture Buffer Value of Building Materials and its Application in Building Design. In E. de Oliveira Fernandes, M. Gameiro da Silva, & J. Rosado Pinto (Eds.), *Healthy Buildings HB2006 Vol. III Design and operation of healthy buildings* (pp. 57–62). Lisbon, Portugal.
- Skimmel.dk. (n.d.). Retrieved December 6, 2019, from <https://www.skimmel.dk/for-beboere/hvad-er-skimmelsvamp/>
- Sundhedsstyrelsen. (2005). *Helbredsproblemer ved fugt og skimmelsvampe i bygninger - om udredning og diagnostik hos alment praktiserende læger*. Sundhedsstyrelsen. Copenhagen, Denmark. Retrieved from <https://hygiejne.ssi.dk/-/media/arkiv/subsites/infektionshygiejne/retningslinjer/vandskade/sst-helbredsproblemer-ved-fugt-og-skimmelsvampe-i-bygninger-2005.pdf?la=da>

BILAG

9 BILAG

9.1 Placering af udstyr i de 30 huse

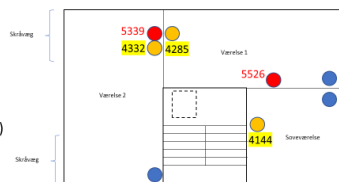
Hus 1, vinter

1. sal

Source ●
Sampler ●
T/RH ●

Volumen: 571 m³ (hele bolig)

N ←

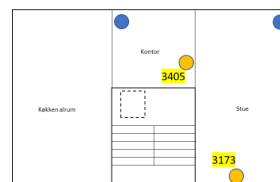


Stueetage

Source ●
Sampler ●
T/RH ●

Volumen: 571 m³ (hele bolig)

N ←

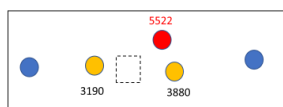


Loft

Source ●
Sampler ●
T/RH ●

Volumen: 59m³

N ←



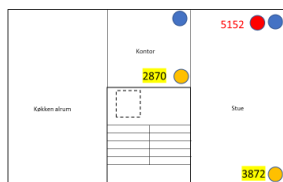
Hus 1, sommer

Stueetage_sommermålinger

Source ●
Sampler ●
T/RH ●

Volumen: 571 m³ (hele bolig)

N ←



1. sal_sommermålinger

Source ●
Sampler ●
T/RH ●

Volumen: 571 m³ (hele bolig)

N ←

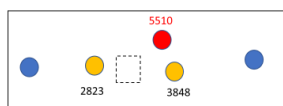


Loft_sommermålinger

Source ●
Sampler ●
T/RH ●

Volumen: 59m³

N ←



Hus 2, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

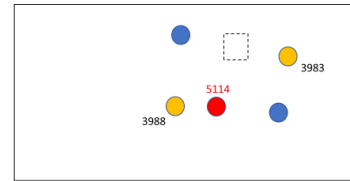
Volumen: 252 m³ (gamle bygning)
(V inkl tilbygning ~ 460m³)



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 49m³



Hus 2, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

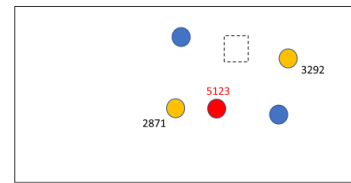
Volumen: 252 m³ (gamle bygning)
(V inkl tilbygning ~ 460m³)



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 49m³



Hus 3, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

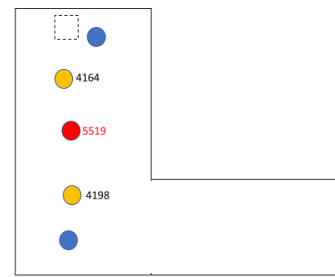
Volumen: 365 m³



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 130m³



Hus 3, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 365 m³



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 130m³



Hus 4, vinter

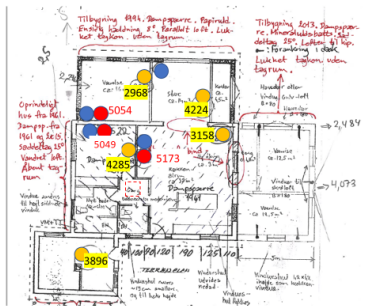
Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 350 m³

N

Ude måltur:
5056

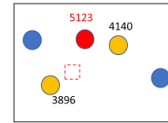


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 56m³

N



Hus 4, sommer

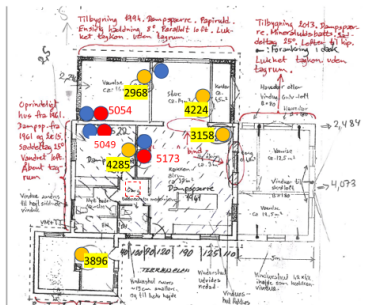
Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 350 m³

N

Ude måltur:
5056

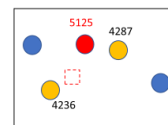


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 56m³

N



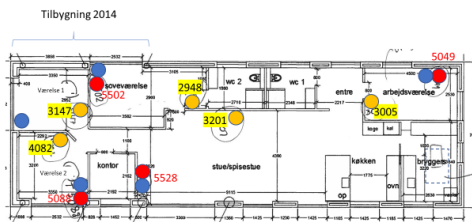
Hus 5, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 356 m³

N

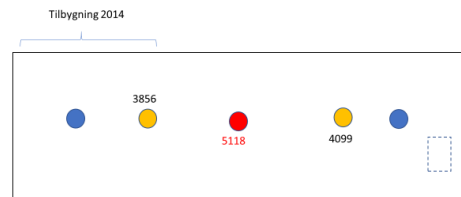


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 141m³

N



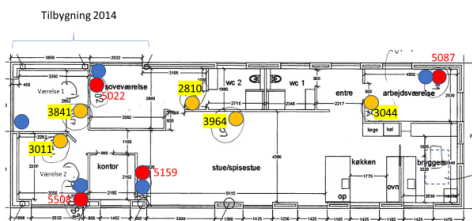
Hus 5, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 356 m³

N

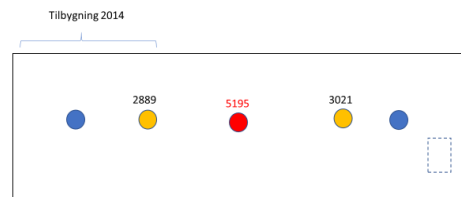


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 141m³

N



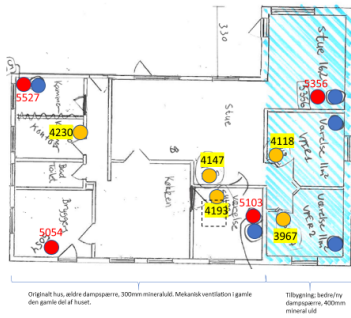
Hus 6, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 390 m³

N

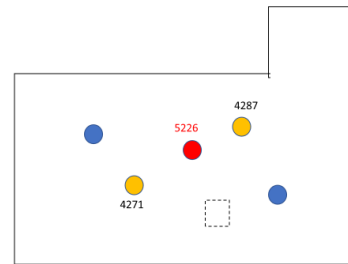


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 85m³

N



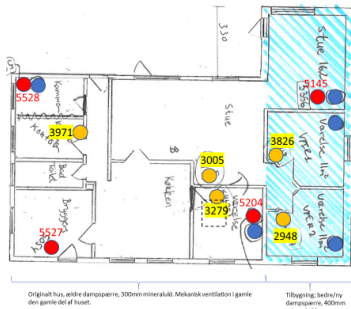
Hus 6, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 390 m³

N

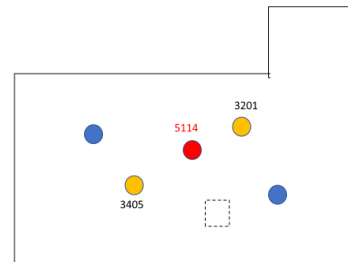


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 85m³

N



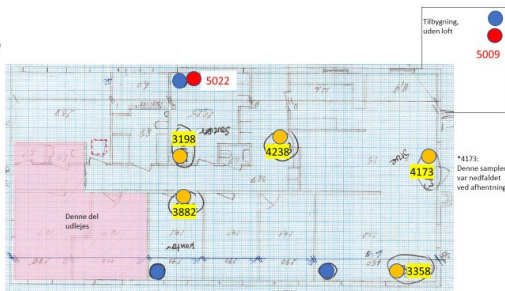
Hus 7, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 635 m³

N

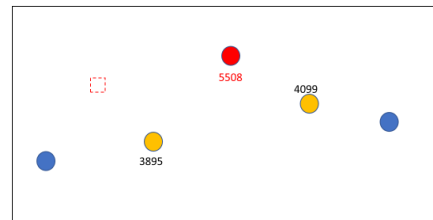


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 254m³

N



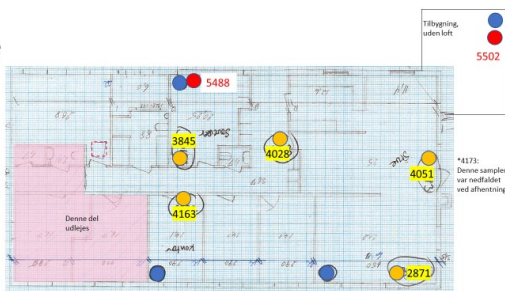
Hus 7, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 635 m³

N



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 254m³

N



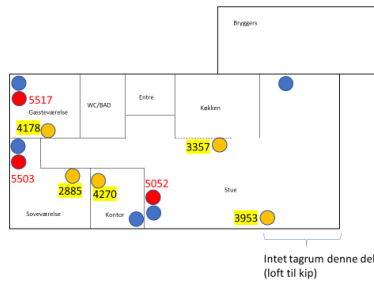
Hus 8, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 378 m³

N ←



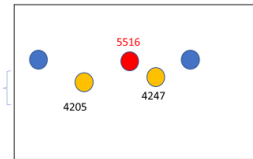
Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 70m³

N ←

Loftsindgang i gavl udefra, Nord



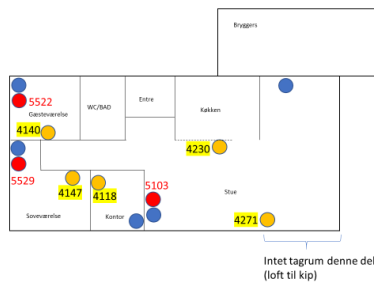
Hus 8, sommer

Stueetage_sommermålinger

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 378 m³

N ←



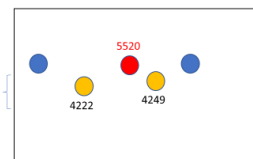
Loft_sommermålinger

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 70m³

N ←

Loftsindgang i gavl udefra, Nord



Hus 9, vinter

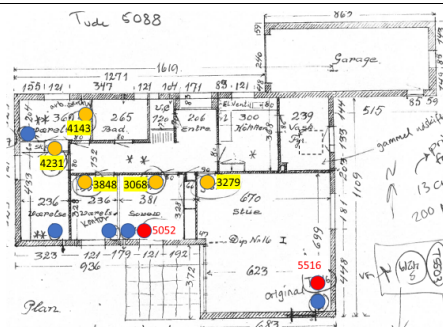
Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 365 m³

N ↑

note måltid: 5088

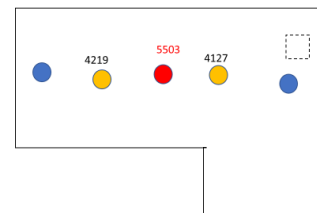


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 110m³

N ↑



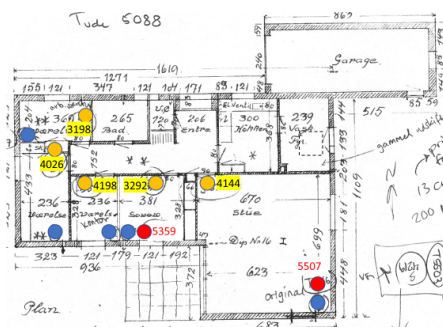
Hus 9, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 365 m³

N ↑

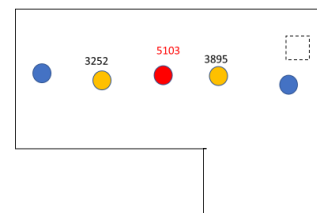


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 110m³

N ↑

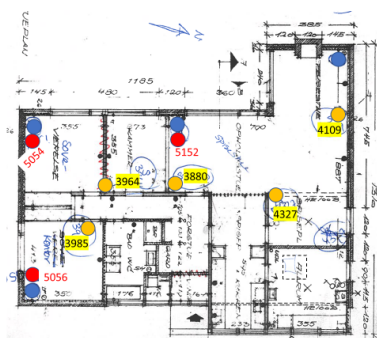


Hus 10, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

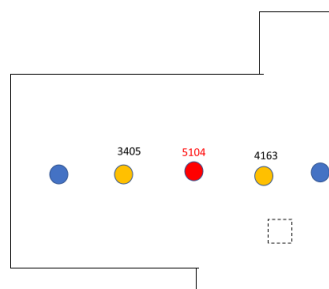
Volumen: 365 m³



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 107m³

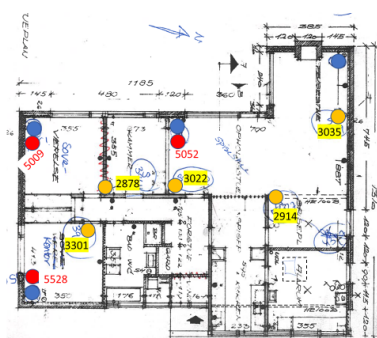


Hus 10, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

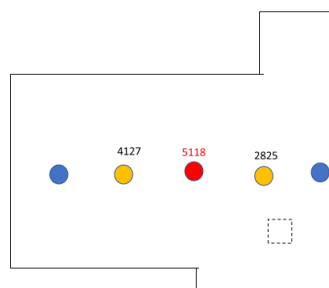
Volumen: 365 m³



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 107m³



Hus 11, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

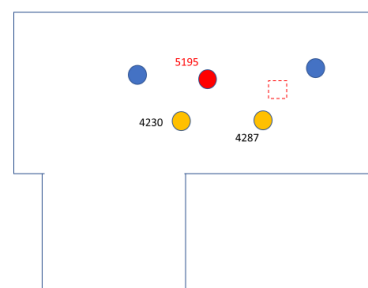
Volumen bolig: 391m³



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen tagrum: 133m³

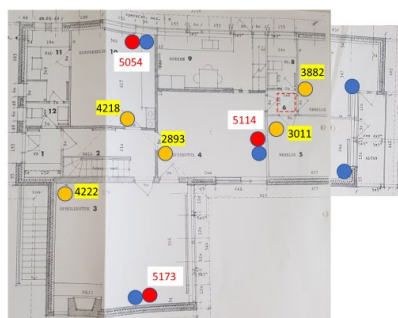


Hus 11, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

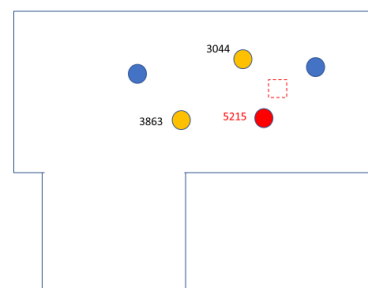
Volumen bolig: 391m³



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen tagrum: 133m³



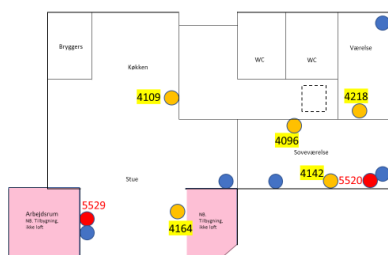
Hus 12, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 387 m³

N ←

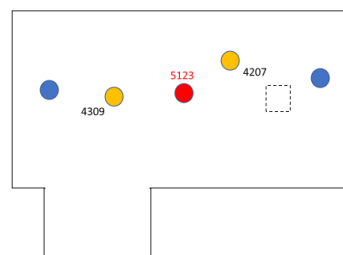


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 130m³

N ←



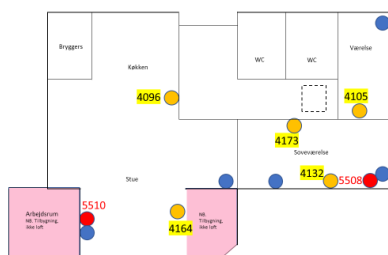
Hus 12, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 387 m³

N ←

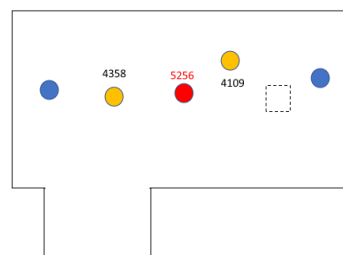


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 130m³

N ←



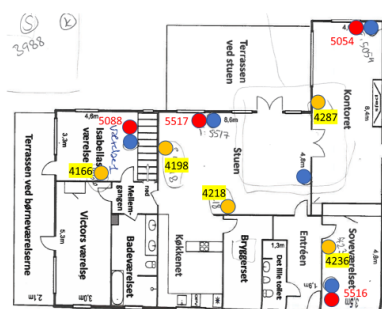
Hus 13, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 385,4 m³

N ↗

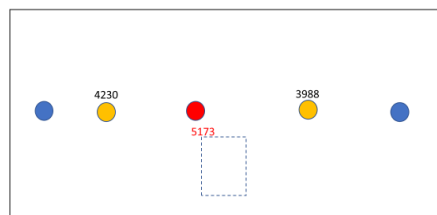


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 174,6m³

N ↗



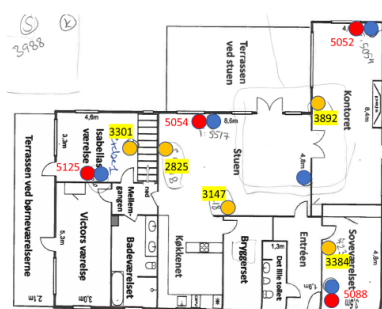
Hus 13, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 385,4 m³

N ↗

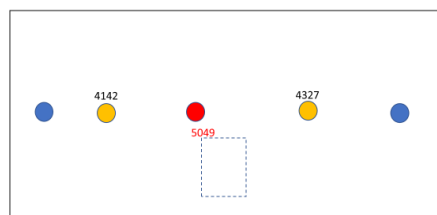


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 174,6m³

N ↗



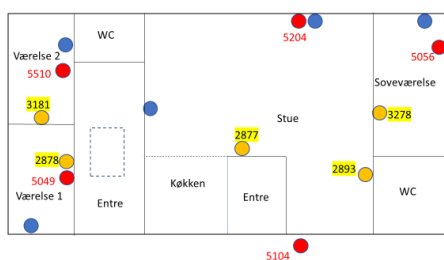
Hus 14, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 288,5 m³

N

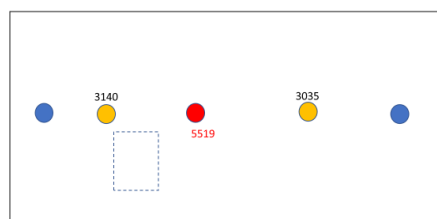


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 140,4m³

N



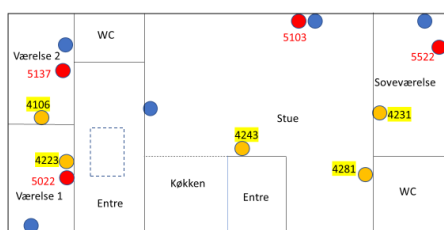
Hus 14, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 288,5 m³

N

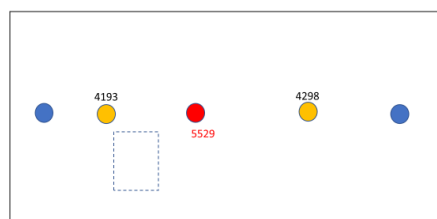


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 140,4m³

N



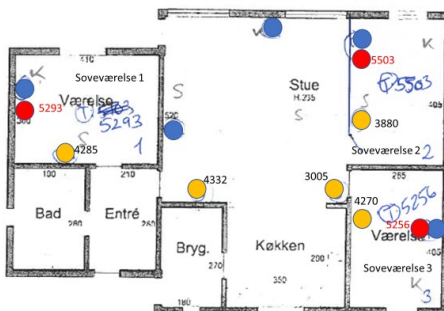
Hus 15, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 208,4m³

N

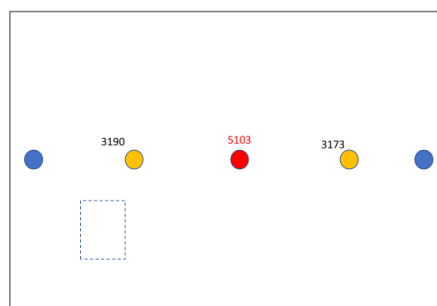


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 90,6m³

N



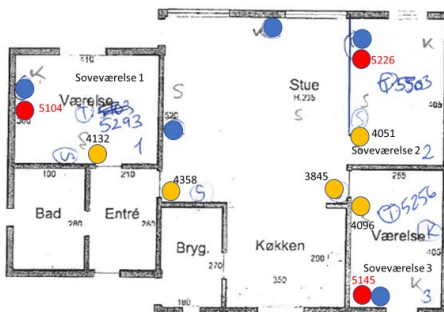
Hus 15, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 208,4m³

N

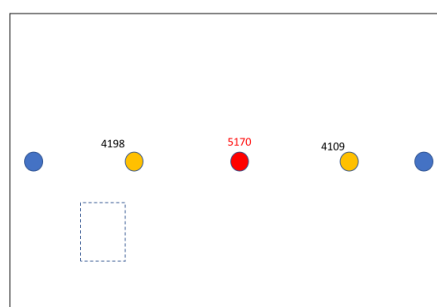


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 90,6m³

N



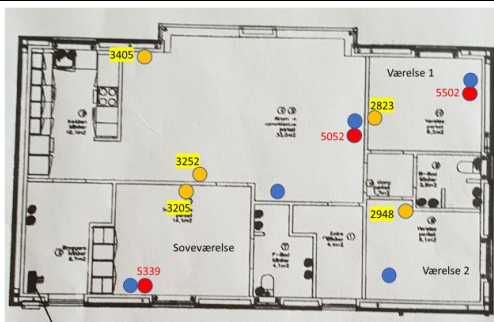
Hus 16, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 263 m³

N

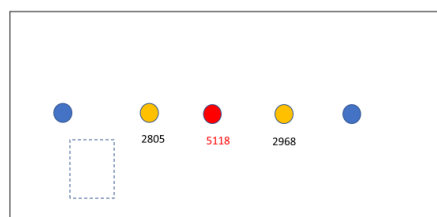


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 70m³

N



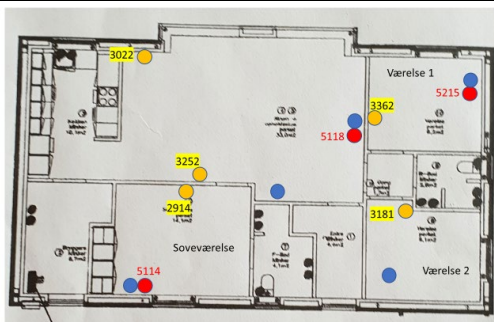
Hus 16, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 263 m³

N

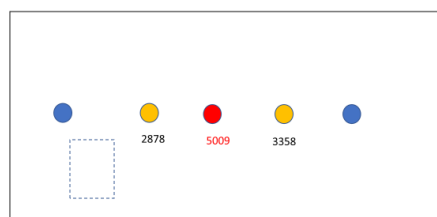


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 70m³

N



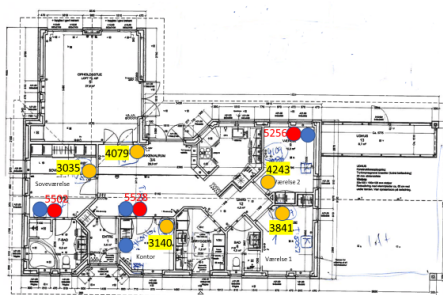
Hus 17, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 450 m³

N

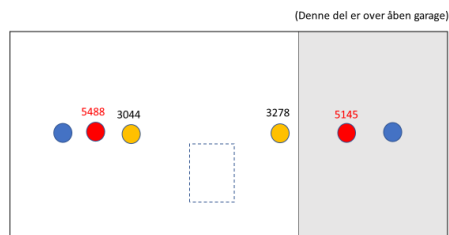


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 108m³

N



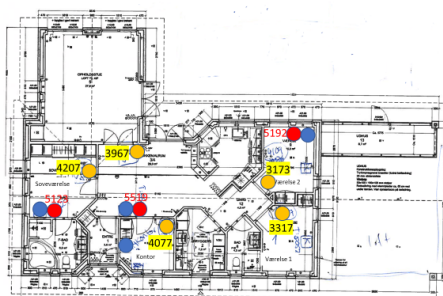
Hus 17, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 450 m³

N

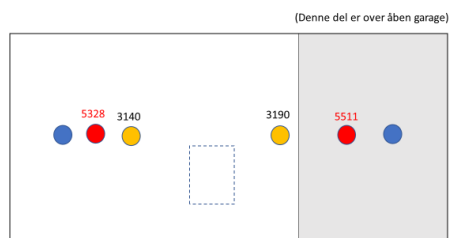


Loft

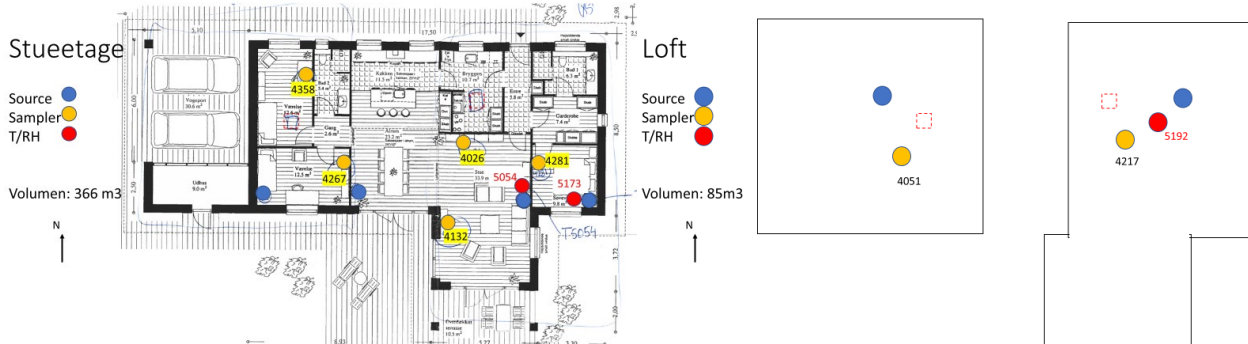
Source
Sampler
T/RH

Volumen: 108m³

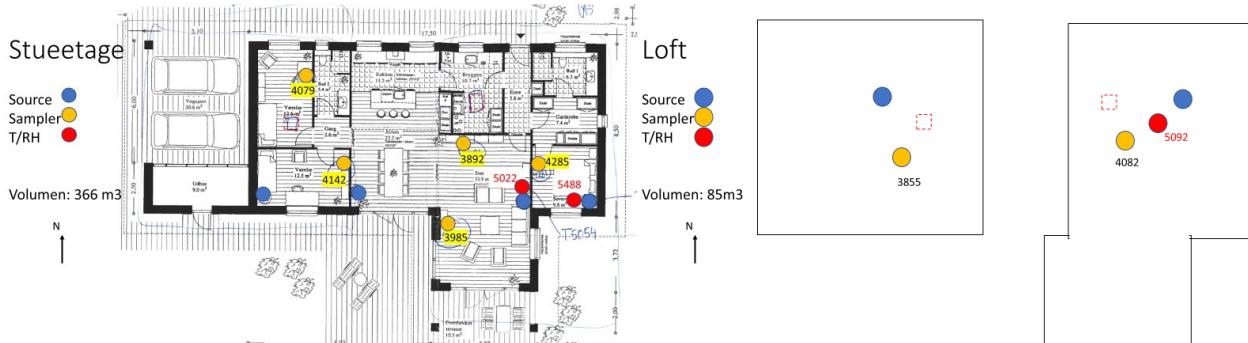
N



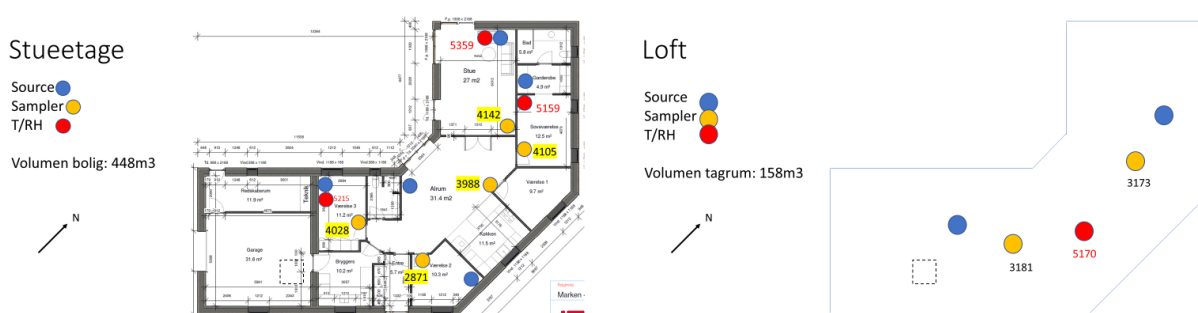
Hus 18, vinter



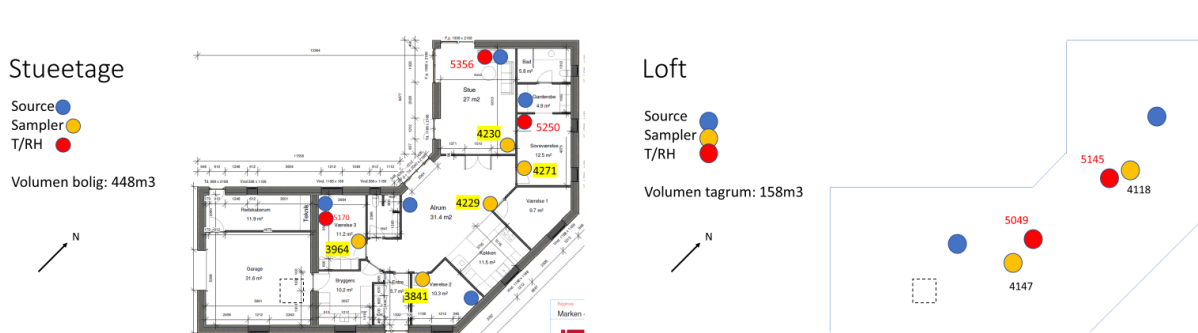
Hus 18, sommer



Hus 19, vinter



Hus 19, sommer



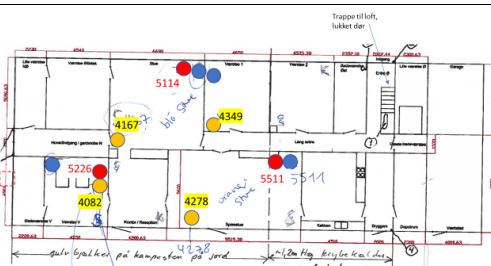
Hus 20, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 1010 m³

N

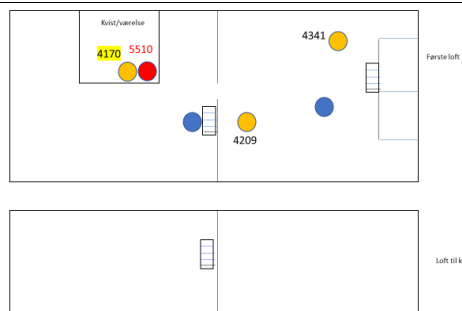


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 1777m³

N



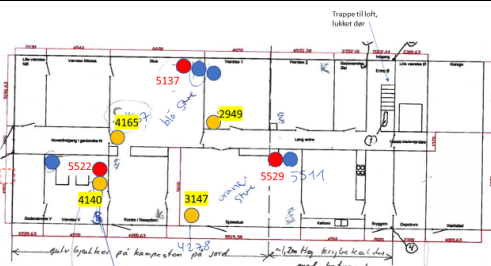
Hus 20, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 1010 m³

N

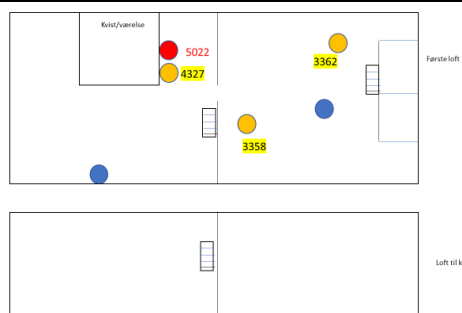


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 1777m³

N



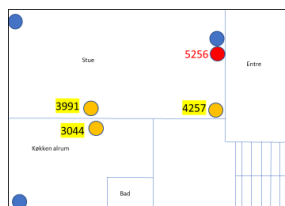
Hus 21, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 250 m³ (begge etager)

N

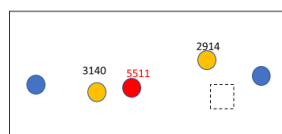


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 33m³

N

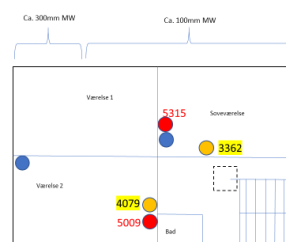


1. sal

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 250 m³ (begge etager)

N



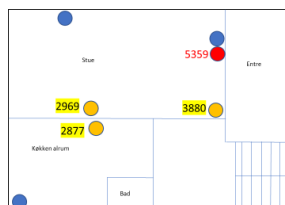
Hus 21, sommer

Stueetage_sommermålinger

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 250 m³ (begge etager)

N



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 33m³

N

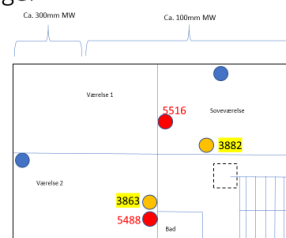


1. sal_sommermålinger

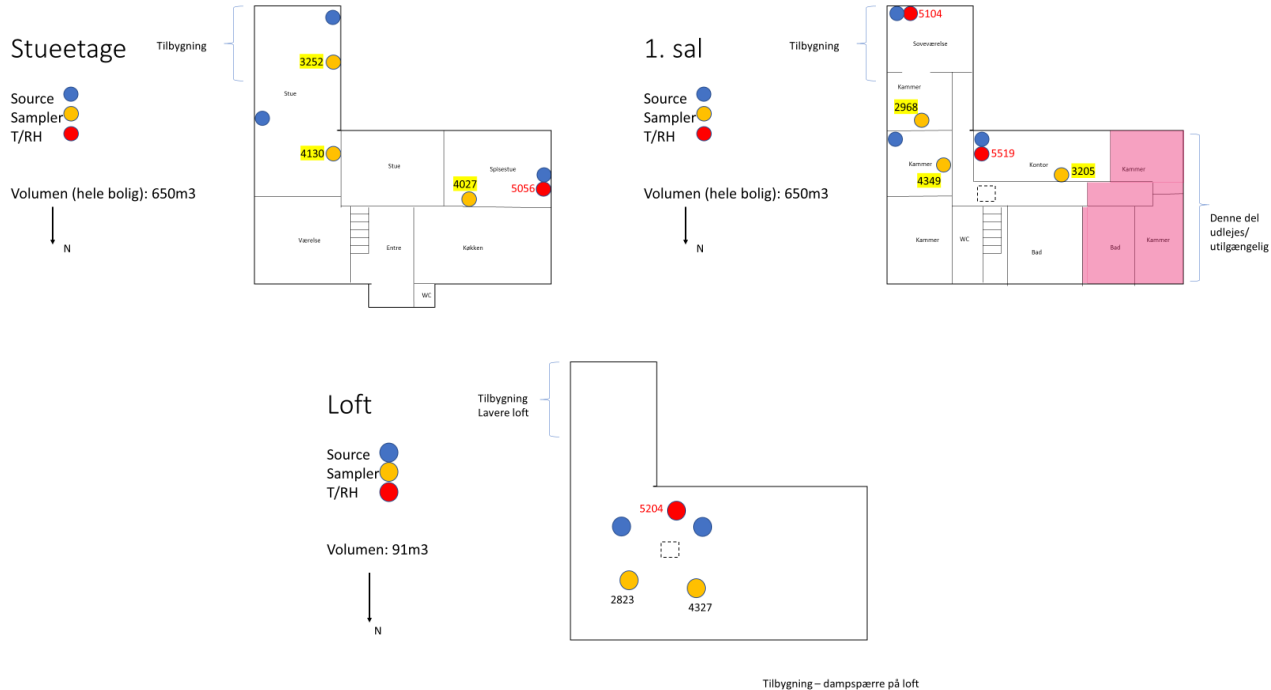
Source
Sampler
T/RH

Volumen: 250 m³ (begge etager)

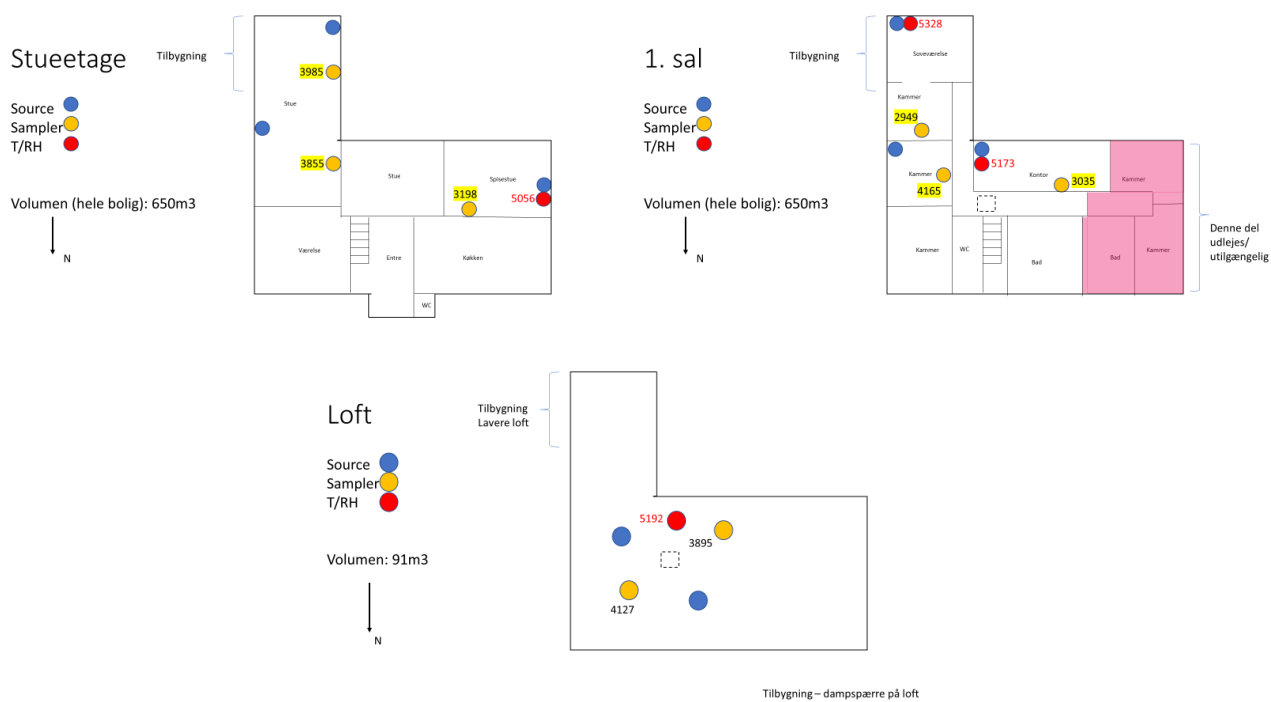
N



Hus 22, vinter



Hus 22, sommer



Hus 23, vinter

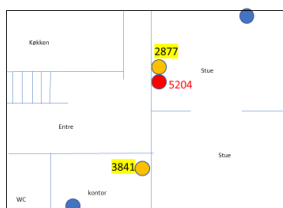
Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 430 m3 (begge etager)

N ↑

Inde måling:
5152

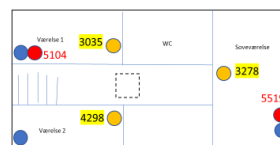


1. sal

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 430 m3 (begge etager)

N ↑

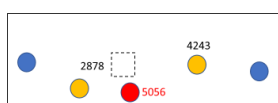


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 30m3

N ↑



Hus 23, sommer

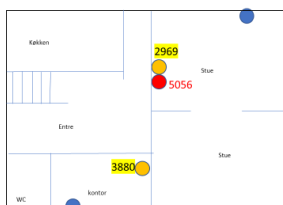
Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 430 m3 (begge etager)

N ↑

Inde måling:
5527

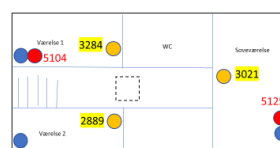


1. sal

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 430 m3 (begge etager)

N ↑

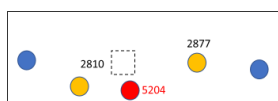


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 30m3

N ↑



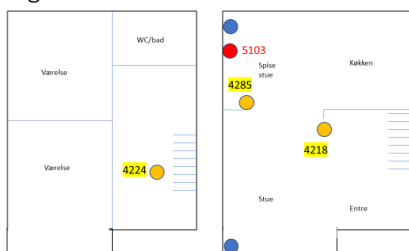
Hus 24, vinter

Kælder og stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen bolig,
inkl kælder: 320 m³
Volumen tagrum: 12m³

N

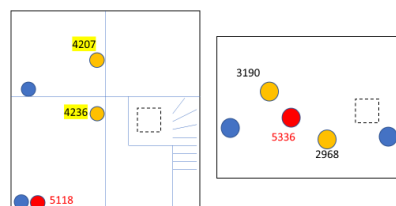


1. Sal og loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen bolig,
inkl kælder: 320 m³
Volumen tagrum: 12m³

N



Hus 24, sommer

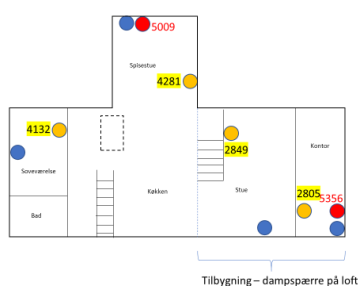
Hus 25, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 275m³

N

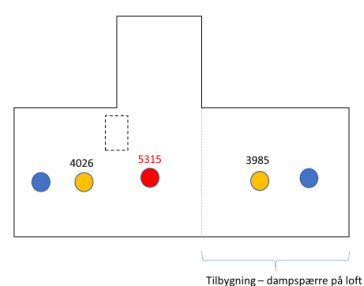


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 114m³

N



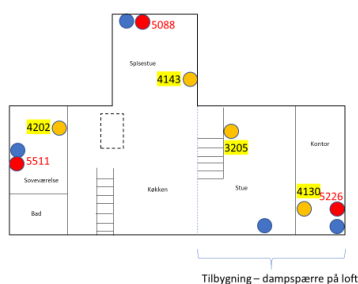
Hus 25, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 275m³

N

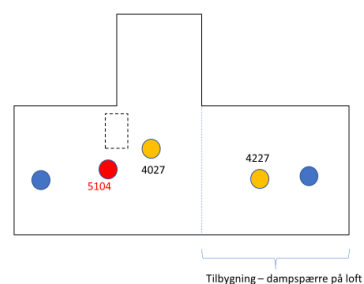


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 114m³

N



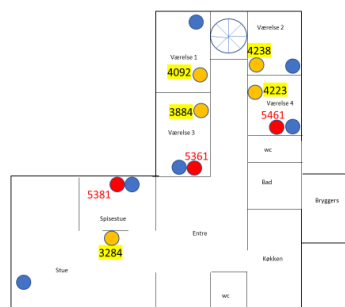
Hus 26, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 380m³

N

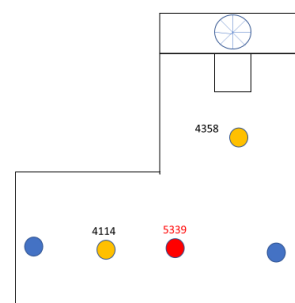


Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 153m³

N

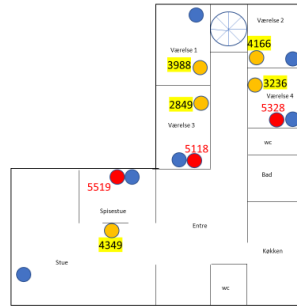


Hus 26, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

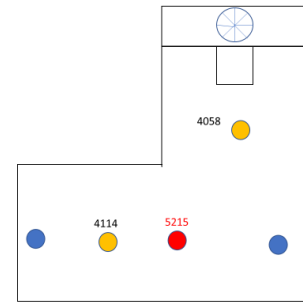
Volumen: 380m3



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 153m3

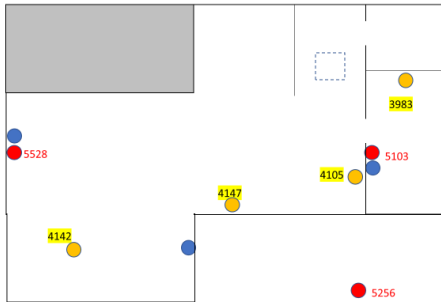


Hus 27, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

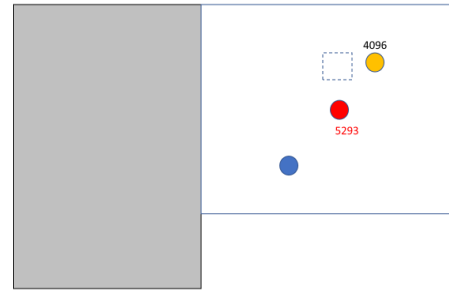
Volumen: 140 m3



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 24m3

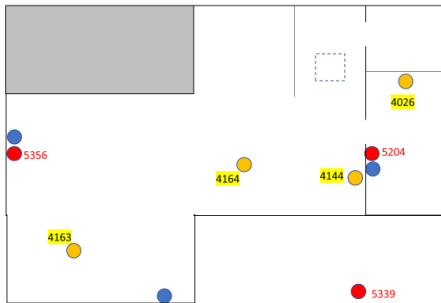


Hus 27, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

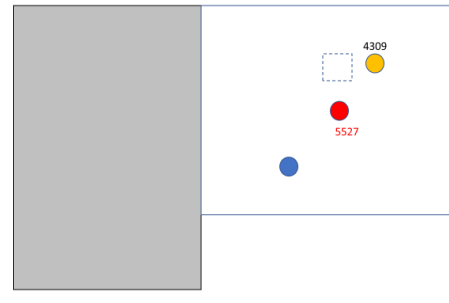
Volumen: 140 m3



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 24m3

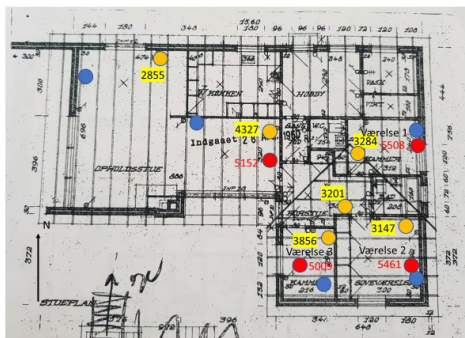


Hus 28, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 340m3



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 141m3

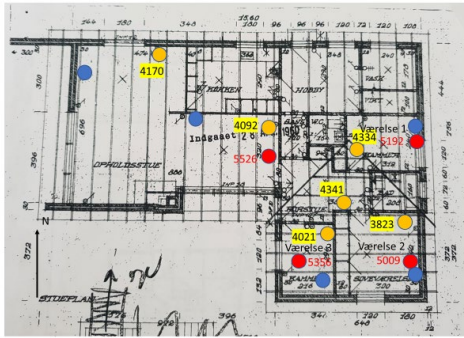


Hus 28, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

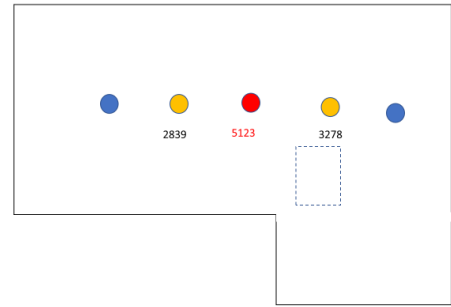
Volumen: 340m³



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 141m³

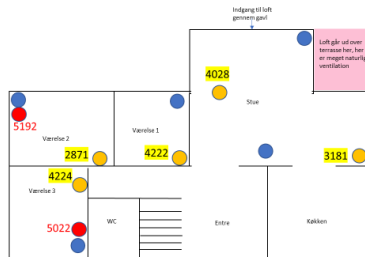


Hus 29, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

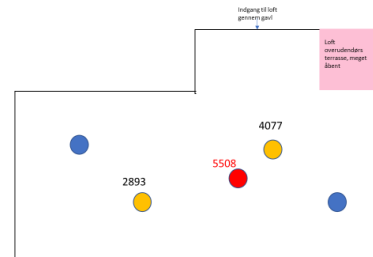
Volumen: 364 m³



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen: 114m³



Hus 29, sommer

Hus 30, vinter

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen bolig: 226m³



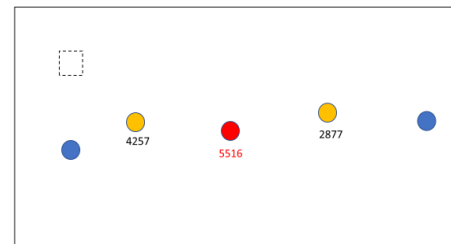
T ude: 5503



Loft

Source
Sampler
T/RH

Volumen tagrum: 127m³



Hus 30, sommer

Stueetage

Source
Sampler
T/RH

Volumen bolig: 226m³



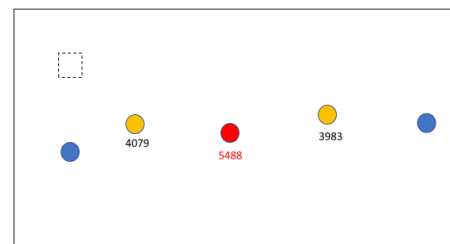
T ude: 5503



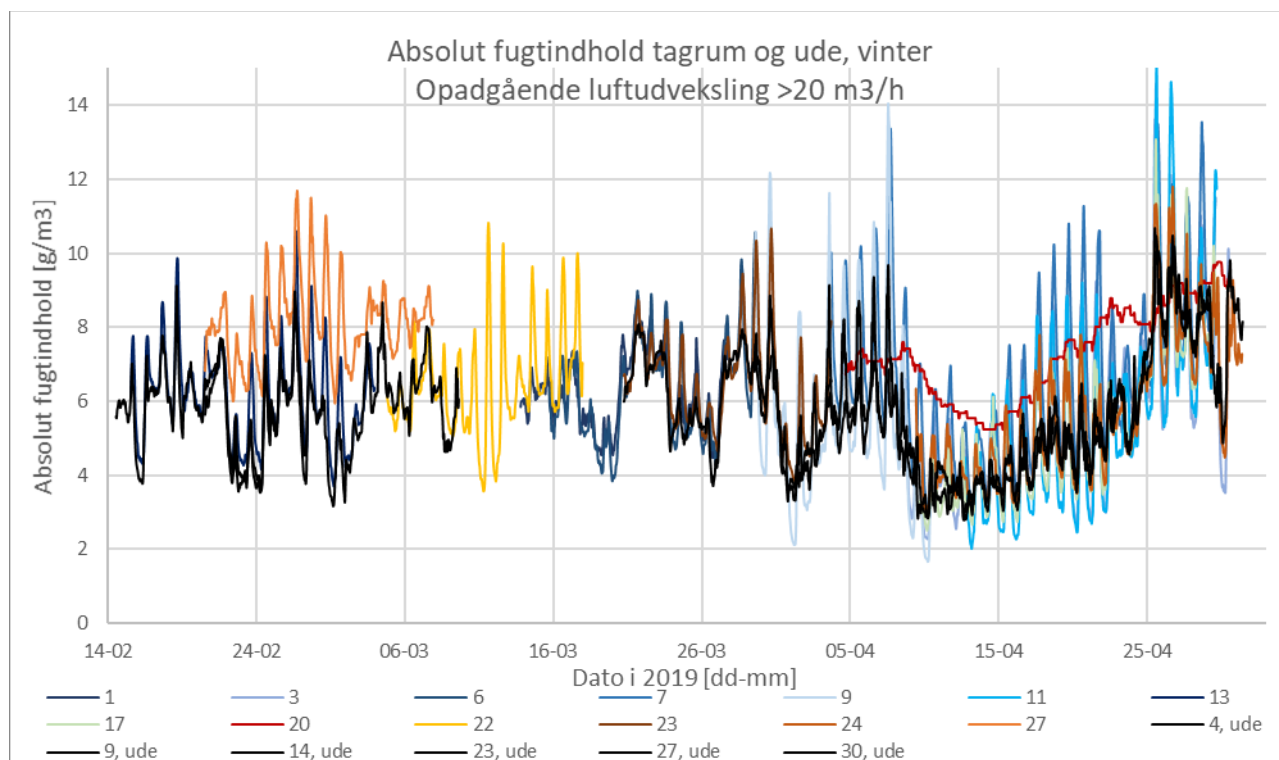
Loft

Source
Sampler
T/RH

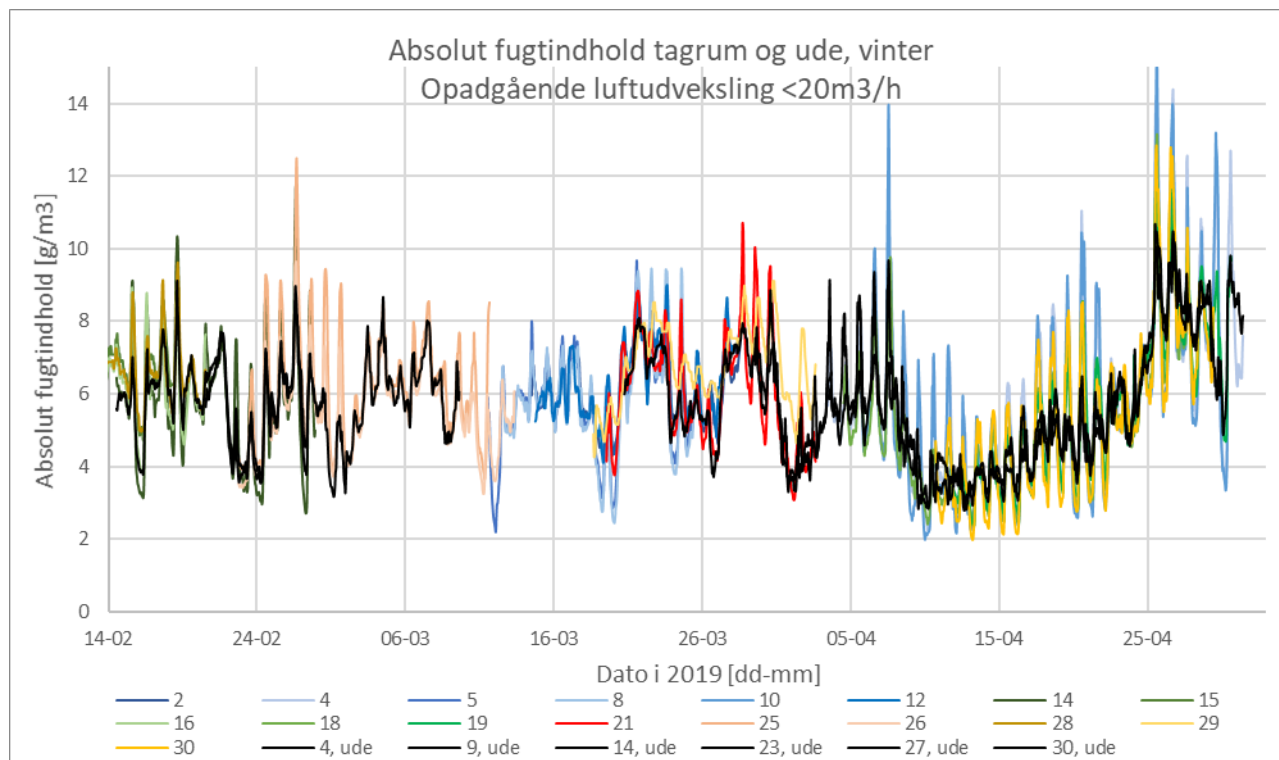
Volumen tagrum: 127m³



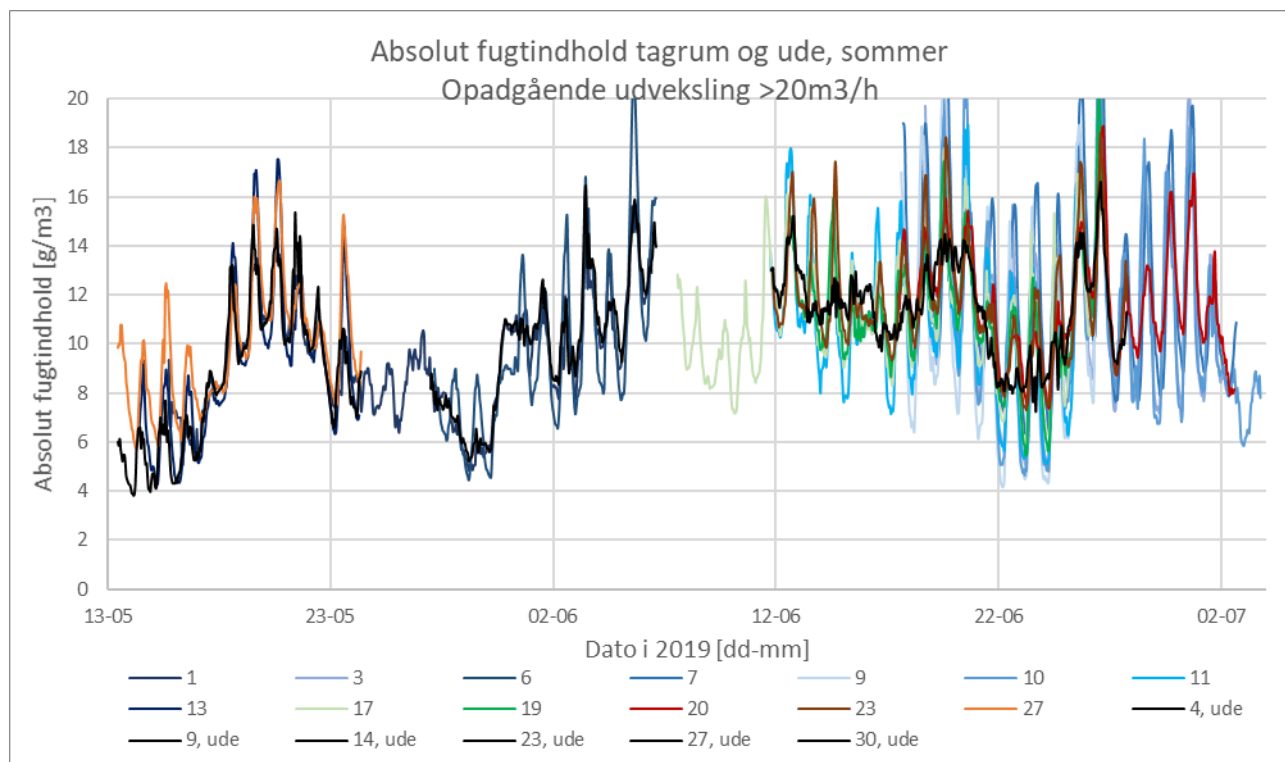
9.2 Absolut fugtindhold i tagrum i forhold til opadgående luftoverføring



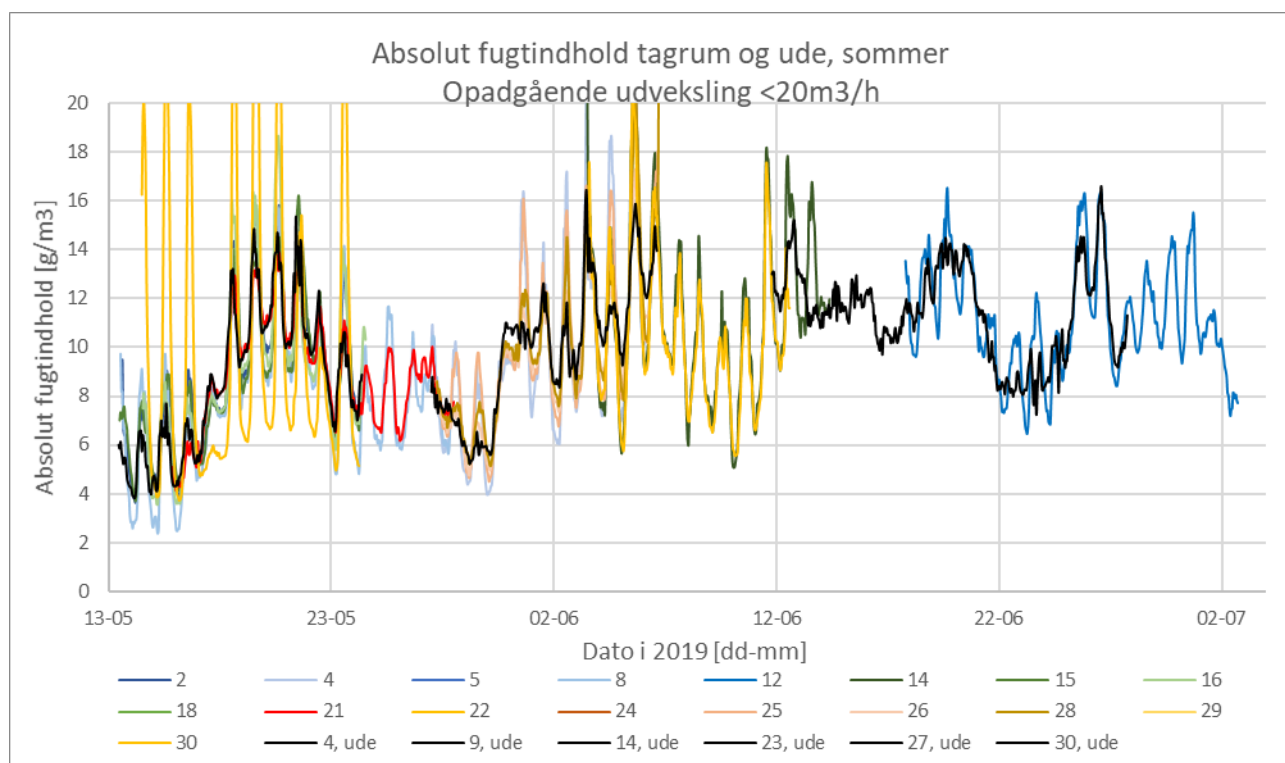
FIGUR 40. Absolut fugt i tagrum for huse med høj opadgående luftudveksling jf. tabel 4 og figur 23, vinter



FIGUR 41. Absolut fugt i tagrum for huse med lav opadgående luftudveksling jf. tabel 4 og figur 23, vinter



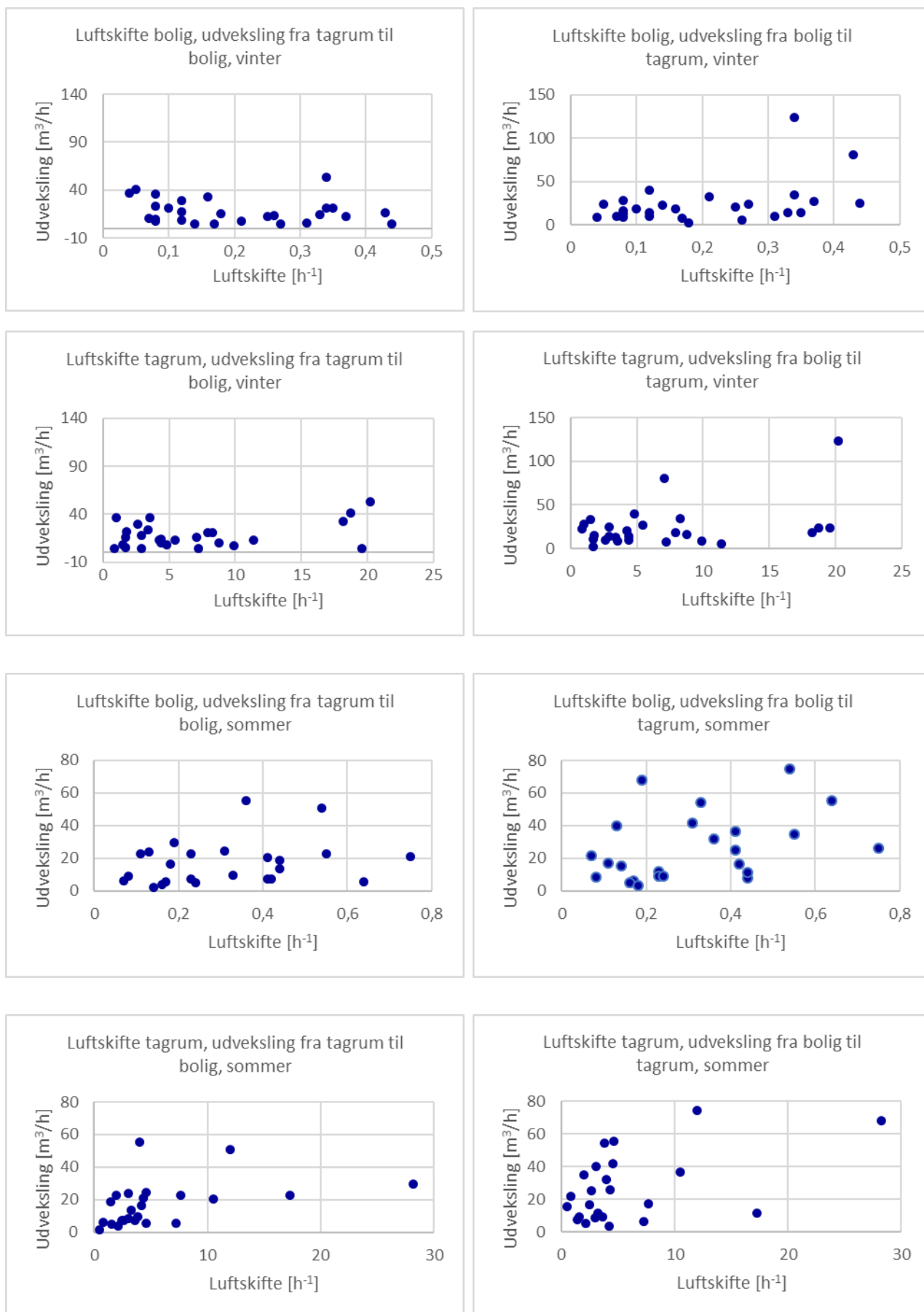
FIGUR 42. Absolut fugt i tagrum for huse med høj opadgående luftudveksling jf. tabel 4 og figur 23, sommer



FIGUR 43. Absolut fugt i tagrum for huse med lav opadgående luftudveksling jf. tabel 4 og figur 23, sommer

9.3 Udveksling som funktion af luftskifte

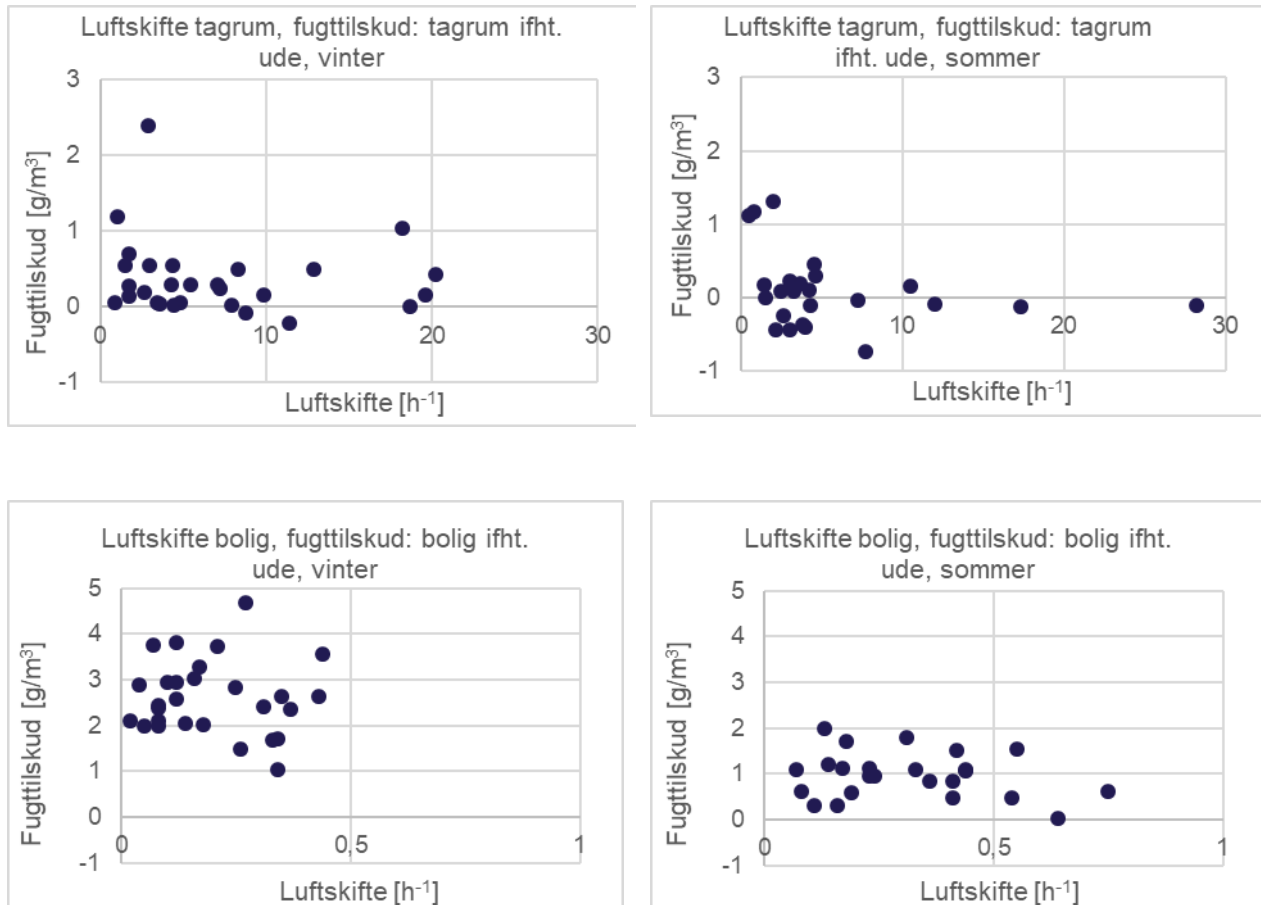
Gennemsnitlig luftoverføring mellem bolig og tagrum som funktion af luftskifte i hhv. bolig og tagrum for både vinter og sommer.



FIGUR 44. Luftudveksling som funktion af luftskifte for hhv. vinter og sommer

9.4 Fugttilskud som funktion af luftskifte

Fugttilskud tagrum i forhold til ude som funktion af luftskifte i tagrum og bolig for hhv. vinter og sommer



FIGUR 45. Luftudveksling som funktion af fugttilskud til udeforhold, for bolig og tagrum, t for hhv. vinter og sommer.

Denne rapport præsenterer resultaterne fra forskningsprojektet: Luftudveksling mellem bolig og tagrum, PFT-målinger i 30 huse. Projektet undersøgte, i hvilket omfang der sker udveksling af luft mellem bolig og uudnyttede tagrum. Målet var dels at finde ud af, hvilken betydning skimmelsvamp i et tagrum har for eksponeringen i den underliggende bolig og dels at kunne vurdere, om der sker en fugt-overførelse fra boligen til det uopvarmede tagrum. Undersøgelsen har udelukkende fokuseret på tætheden af loftet mellem beboelsesrum og det uudnyttede tagrum. Luftudvekslingen er undersøgt ved en passiv sporgas metode. Undersøgelsen viser, at der forekommer luftudveksling igennem loftskonstruktioner mellem bolig og uudnyttede og uopvarmede tagrum i både varme og kolde perioder. Udvekslingen mellem zonerne forekommer i begge retninger, og det gør sig både gældende i huse med og uden dampspærre. Undersøgelsen viser desuden, at opadrettet luftoverføring fra bolig til tagrum medfører forhøjede fugtforhold i uudnyttede, uopvarmede tagrum. Det sidste bekræfter, at god ventilation af tagrum med udeluft er afgørende for at reducere risikoen for skimmelsvampevækst. Rapporten er en vigtig brik i vores forståelse af de elementer, der spiller en rolle for henholdsvis holdbare og robuste bygningskonstruktioner og et godt indeklima.