

Luftflöde genom vädring i ett sidohängt fönster

- Mätning och simulering



LUNDS
UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg
Institutionen för bygg- och miljöteknologi / Avdelningen för installationsteknik

Examensarbete TVIT—23/5100
Jesper Engström

Luftflöde genom vädring i ett sidohängt fönster
– mätning och simulering

Jesper Engström

Examensarbete

Avdelningen för Installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

© Jesper Engström

ISRN LUTVDG/TVIT—23/5100--SE(74)
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 LUND

Sammanfattning

Enligt EUs senaste direktiv kan medlemsländernas befintliga byggnader behöva energieffektiviseras. Hittills har byggnaders energianvändning beräknats med normaliserade brukare, vilket avspeglar byggnadernas medelanvändande baserat på befintligt brukarbeteende. Förändringarna ställde krav på bättre underlag för brukarrelaterade indata, samt även på en metod för energiberäkningar av vädring. Därför fokuserades detta examensarbete till att utvärdera simulering som metod. Utvärderingen fokuserades till att beskriva en del av brukarbeteendet för vädring, riktat till återskapande av luftflödet vid olika fönsters öppningsvinklar. Genom återskapande av byggnaden och mätningarna, kunde olika modeller för fönsteröppningars areor simuleras. Resultaten jämfördes emot data ifrån mätningarna av motsvarande vädringsfall. Resultaten visade att det fanns skillnader mellan simuleringarna och mätningarna, bland annat avseende luftflödes och temperaturvariationer under förloppen. Orsaken till skillnaderna kunde inte besvaras men diskuterades bland annat bero på skillnader i omblandning. Om simuleringsmodellen används för att utföra energiberäkningar av vädring med sidhängt fönster, så har resultaten med förutsättningarna i detta arbete visat att det leder till att luftflödet underskattas.

Nyckelord: vädring, simulering, fönsteröppning, öppningsvinkel, öppningsarea, energiberäkning

Abstract

The latest European Union directive pressures the member states to increase existing building energy efficiency. Calculations of building energy has in Sweden a dependency of normalized user behaviour data, which has reflected the average use based on existing data. Changes increase the demand for better background data on usage of dwellings, as well as a method for calculating the energy use due to window airing. Therefore, this thesis aimed to evaluate simulation as a method. The evaluation was focused to description of one part of dwellers airing behaviour, directed against recreation of window airing airflow. With recreation of the building and measurements, it was possible to simulate different models for window opening areas. By comparison of the simulated results against measurements in each airing case, it was possible to show differences concerning airflow and temperature variations. The main cause was not answered, however it was discussed that it could have been dependent on mixture differences. If the simulation software is used to perform energy calculations of airing with side-hung windows, the results of this thesis have shown that it leads to underestimation of airflow.

Keywords: airing, simulation, window opening, opening angle, opening area, energy

Förord

Detta examensarbete skrivs som ett avslut på högskoleingenjörsutbildningen i byggt teknik vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet genomförs vid avdelningen för installationsteknik på Lunds Tekniska Högskola under våren 2023.

Jag vill rikta ett generellt tack till alla som bidragit till att göra arbetet möjligt.

Helsingborg, maj 2023
Jesper Engström

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	4
1.3 Målformulering	4
1.4 Problemformulering	4
1.5 Avgränsningar	4
2 Teori	5
2.1 Energiprestanda	5
2.1.1 Dynamisk energiberäkning.....	5
2.1.2 Vädning i dynamisk energiberäkning	8
2.2 Luftflöde genom en öppning	9
3 Metod	19
3.1 Litteratursökning	19
3.2 Mätning och simulering	20
3.2.1 Byggnaden.....	20
3.2.2 Mätningar	22
3.3 Simulering av vädning	27
3.3.1 Modellen	27
3.3.2 Återskapande.....	29
3.3.3 Metoderna för fönsteröppning	30
3.3.3.1 <i>Linjär</i>	31
3.3.3.2 <i>Beräknad</i>	32
3.3.3.3 <i>SEAM</i>	33
3.3.4 Postprocessering	34
4 Resultat	37
5 Diskussion	51
6 Slutsatser	57
7 Ev. framtida forskning	59
Referenser	61

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Den europeiska klimatlagen påskyndar omställningen för visionen om ett klimatneutralt EU till 2050 och fastställer enligt Rådet (2023) att medlemsländerna ska minska 1990 års nettoutsläpp av växthusgaser med 55 % till 2030. Rådet belyser att byggnader inom EU motsvarar 36 % av växthusgasutsläppen och 40 % av energianvändningen, Energiläget 2022 visar att det senare även gäller för Sverige (Energimyndigheten, 2022). I samma rapport av Rådet (2023) framhålls därför att en viktig del i 55 %-målet är att göra byggnader i EU energieffektivare, vilket genomförs med en revidering av gällande 2018 års direktiv om energiprestanda (EPBD). Enligt regeringskansliets fakta-pm innebär revideringsförslaget dels krav på att nya bostäder från 2030 ska vara noll-emissionsbyggnader, dels krav på att införa miniminivåer för befintliga byggnaders energiprestanda (Regeringskansliet, 2022). Exakt hur revideringen i slutet påverkar den svenska bygglagstiftningen är ännu oklart, men Sverige som medlemsstat kommer att behöva göra förändringar i linje med 55 %-målet.

Boverkets nuvarande energihushållningskrav (från 2018 direktivet) baseras på två delar. Den ena är byggnadens energiprestanda som sammanvägt mått på de bygg- och installations-tekniska egenskaperna. Den andra är byggnadens energianvändning med krav på mängden levererad energi till byggnaden, vid normalt brukande under normalår (Boverket, 2022). Delarna sammanlänkas med byggnadens primärenergital, ett värde som baseras på byggnadens energianvändning och som ligger till grund för byggnadens energiprestanda. De två delarna är därför beroende av varandra och energieffektiva byggnader kan inte uppnås genom enbart en av delarna (Boverket, 2020). Energiprestanda kan således inte beräknas utan att energianvändningen först fastställts. Detta kan enligt ”Boverkets föreskrifter och allmänna råd (2016:12) om fastställande av byggnadens energianvändning vid normalt brukande och ett normalår” (BEN) version 2, göras med antingen mätning eller beräkning (Boverket, 2017).

Trots att det idag i BEN endast är lokaler som har krav på dynamisk energiberäkning är det vanligt förekommande att energisimuleringar med denna metod används för fastställande av även bostäders energianvändning. I energisimuleringar används då indata för normalt brukande definierat i boverkets föreskrift BEN, där normalt brukande syftar till att avspegla standardiserat användande av byggnaden. Medel-användning förutsätts då baserat på befintliga data, vilket kan avvika från framtida användandet.

Hur väl befintliga data speglar det framtida användandet varierar, därav även avvikelser. I stora bostäder med många brukare kan ytterligheter ta ut varandra, till skillnad från i enskild bostad där risken för avvikelse blir större. Samtidigt bidrar samhällsutveckling och politiska beslut till beteendeförändringar i användandet. Därav kan avvikelser emot befintliga data förändras med effekterna av energipriser eller pandemier, men även med ändrade EU-krav. Beräkningarnas riktighet ställer därför krav på minskade avvikelser.

Vanliga brukarparametrar är bland annat tappvarmvatten, hushållsel, personvärme, inomhustemperatur och vädring. Att samla in data gällande dessa kan vara mer eller mindre svårt. Hushållsel, inomhustemperatur och tappvatten anses lättare då mätutrustning kan monteras för enskilda användningsstället i riktiga bostäder. Personvärme kan erhållas från mätningar i labbmiljöer. Det svåra är att över året veta när och hur många som förväntas bruka bostaden, vilket är svårt att mäta. Mätning av den extra uppvärmningsenergin som fås till följd av vädring är svår eftersom den måste urskiljas från den ordinarie uppvärmningsenergin. Samtidigt finns också en variation av anledningar till behovet av vädring, exempelvis hög inomhustemperatur eller lågt ventilationsflöde. Därav kommer det också att vädras olika; ofta, länge, mycket och med olika fönstertyper där kombinationen av dessa påverkar mängden utbytt luft. För att kunna simulera detta krävs därtill både inomhus och utomhusförhållandena för detta förlopp.

Boverket har i BEN 2 för vädring, ett allmänt råd att öka energianvändningen med $4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$ om inget annat kan motiveras. Sveby är ett program som drivs av bygg och fastighetsbranschen. De arbetar för att minska skillnaden mellan den förväntade och verifierade energianvändningen i byggnader. Bland annat genom att i Sveby-programmet fastställa standardiserade brukardata för beräkningar, likt de som återfinns i BEN (Per Levin, 2017). Boverket och Sveby anger båda för vädring samma energipåslag. Sveby poängterar dock att variationerna i vädringsvanorna från sitt underlag är stora för öppningsgrad och tid, samt resulterande luftomsättning (SVEBY, 2012).

Det har forskats om vädring i bostäder i Sverige, bland annat i Malmö som ett resultat ur Hansson & Nordquist rapport Uppföljningen av flagghusens lägenhetskvarter 2010. Där verifiering av energianvändningen för lägenheterna visade att det överskred den för projektet förväntade energianvändningen. Det framkom att brukare vädrade lägenheterna ofta och länge. Upptäckten gav stöd för en utökad studie inriktad på att förstå vädringsvanorna och faktorerna som påverkar dem (Hansson & Nordquist, 2010).

En fördjupad enkätstudie genomfördes 2012 där Fransson och Lindberg kunde visa att både dålig luftkvalitet och termisk komfort var stora orsaker till vädring bland brukarna. Även att de brukare som varit nöjda med inomhusklimatet, också hade vädrat. Därmed kunde det inte uteslutas att vädringen var nödvändig för att uppnå det önskade inomhusklimatet (Fransson och Lindberg (2013)).

Abdul Hamid och Ibrahimovic utvärderade storleksordningen av vädringens energiförluster från flagghusen i deras examensarbete 2013. De utförde mätningar och energiberäkningar för två olika vädringsmodeller, där modellerna representerade de två ytterligheterna av ett vädringsförlopp. Ur resultaten beskrev de verkligheten som ett medelvärde av modellerna. Energiförlusten i verkligheten uppgick då till ca $2 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$ vilket jämfördes med Svebys energipåslag för vädring om $4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{år})$ (Abdul Hamid & Ibrahimovic, 2013).

Bergvall & Cerps undersökte 2020 i sitt examensarbete hur väl Svebys brukarindata för vädring passade olika byggnadstyper. De gjorde en enkätundersökning mot hushåll över hela Sverige och baserat på svaren utfördes beräkningar av energiförlusterna. Deras enkätundersökning visade att vädringsvanorna skiljde sig mellan småhus och lägenheter, avseende öppningsgrad och tid. Småhus vädrade sällan, under kortare tid och med större öppning jämfört med lägenheter. Beräkningarna visade för lägenheter liksom småhus att energiförlusterna från vädringar var större då FTX system fanns installerat. Deras slutsats var att vädringstillägg bör vara beroende av byggnadstyp, men även av ventilationssystem (Bergvall & Cerps, 2020).

Beatrice Vad-Schütt Klockervold utförde i sitt examensarbete en enkätundersökning om vädringsbeteende i bostäder. För att uppvisa ett vädringsgenomsnitt, eventuella skillnader mellan grupper samt inverkan på energianvändningen. Beatrice kom fram till att vädringsbeteende berodde av ålder och bostadstyp, att lägenheter vädrades under längre tid men lika ofta som småhus. Beatrice kom även fram till att orsakerna bakom vädringen utgjordes av dålig inomhusluft och höga inomhustemperaturer, precis som i flagghusen.

Forsberg och Lind undersökte i en del av sitt examensarbete 2021 hur vädring inverkade på energianvändningen i ett modernt plusenergihus. De simulerade med IDA-ICE brukarnas inverkan på energianvändningen. De kunde visa att höga vädringsflöden var en av de parametrar som ökade energianvändningen mest. Även att det var mer energieffektivt att ha höga flöden i ventilationssystemet hellre än via vädring (Forsberg & Lind, 2021).

Om det med simulering går att återskapa rätt luftflöde, så är det möjligt att testa variationer av öppningsgrad och tid för resulterande luftomsättning. Detta skulle då kunna användas för att ge ett bättre underlag för beräkning av vädring. Att vädringsförloppet fysikaliskt beskrivs korrekt, eller att det åtminstone kan korrigeras emot verkligheten, är centralt för när man väl har data för hur boende faktiskt vädrar. Mitt arbete kommer utvärdera hur väl simuleringsprogrammet IDA-ICE speglar det verkliga luftflödet. Med data från mätningar för olika öppningsvinklar kommer förutsättningarna i en modell att återskapas och simuleras.

1.2 Syfte

Syftet är att ge ett bättre underlag för energiberäkningar genom simulering. Fokuserat till simulering av vädringsflöde i relation till uppmätta flöden.

1.3 Målformulering

Huvudmålet är att kunna uppvisa om simulering är en bra metod för att beskriva en del av de faktorer som utgör ett vädringsbeteende. I detta riktas fokus till kvantifiering av luftflödet och hur fönstrets öppningsgrad inverkar på luftflödet. Oavsett anledning är önskan med vädring att inomhus uppnå ett luftutbyte. Energiförlusterna till följd av detta kan förenklat för vintertid beskrivas med att nedkylningen av rumsluften, måste kompenseras med en uppvärmning av byggnadens värmesystem.

1.4 Problemformulering

1. Vilka skillnader går att visa mellan simulering och mätning i vädringsförloppet?
2. Hur påverkar fönsteröppningens areabeskrivning luftflödet?
3. Hur stor energiinverkan motsvarar skillnader i medelluftflödet?

1.5 Avgränsningar

Studien avgränsas till den data som är tillgänglig från mätfallet, rumsstorlek, fönstertyp, öppningsgrader, tid, geografisk placering, även till att endast undersöka ensidig vädring. Generell avgränsning till simuleringsprogrammets möjligheter avseende metod. Arbetet begränsas till en förenklad beräkningsmodell för energiinverkan med hänsyn till arbetets omfattning.

2 Teori

2.1 Energiprestanda

Byggnadens energiprestanda uttrycks med primärenergitalet EP_{pet} kWh/m² som beräknas enligt ekv 2.1. Hänsyn tas där dels till valet av energibärare PE exempelvis olja, el eller fjärrvärme. Dels till att uppvärmningsbehovet påverkas av geografisk placering med F_{geo} . Dels till byggnadsstorleken genom att energianvändningen fördelas över uppvärmnings-arean med A_{temp} (Boverket, 2022).

Energianvändningen motsvarar beräknade mängden energi för byggnaden under ett normalår med normalt brukande, enligt Boverkets föreskrifter och allmänna råd (2016:12). I detta inkluderas energi för uppvärmning, tappvatten, fastighetsel och komfortkyla. Komfortkyla menas i detta fall att energi aktivt tillförs för att producera kyla (Boverket, 2022). Avgränsat blir fokus för studien på uppvärmningsenergi-termen när byggnadens energianvändning fastställs.

$$EP_{pet} = \frac{\sum_{i=1} \left(\frac{E_{uppv,i}}{F_{geo}} + E_{kyl,i} + E_{tvv,i} + E_{f,i} \right) \times PE_i}{A_{temp}} \quad 2.1$$

2.1.1 Dynamisk energiberäkning

Då dynamisk energiberäkning används för beräkning av byggnadens uppvärmningsenergi E_{syst} följer detta en beräkningsmodell visualiserat i Figur 2.1. Beräkningsmodellen utgår ifrån en momentan värmebalans ekv 2.2, där förluster skapar ett uppvärmningseffektbehov för att bevara luftens inomhustemperatur T_{luft} i byggnaden. Förlusterna utgörs av transmission P_{trans} ekv 2.3, ofrivilligt luftläckage P_{ov} ekv 2.4 och ventilation P_{vent} ekv 2.5 där storheterna antas vara positiva vilket förutsätter uppvärmning. För uppvärmningssäsongen då $T_{ute} < T_{inne}$ finns samtidigt vinster från internt genererad värme P_{int} och solinstrålning P_{sol} . Effekten av lagrad energi i byggnadens massa P_{mass} påverkar förändringshastigheten av T_{luft} resulterande i en tröghet vid snabba förändringar i T_{luft} . P_{mass} för massa innanför isolerskiktet betraktas därför negativ i ekv 2.2 för uppvärmningssäsongen.

Förenklat för det momentana fallet blir uppvärmningsbehovet P_{syst} summan av förlusterna och vinsterna, vilket momentant ger balans. P_{syst} huvudsyfte är således att balansera vinster och förluster för att nå önskad inomhustemperatur. För att belysa hur det förenklade och verkliga fallet skiljer beskrivs några av de termer som varierar under beräkningens förlopp. Ekv 2.3 - ekv 2.5 har gemensamt att T_{ute} varierar med tiden över året. För P_{ov} och P_{vent} varierar även luftflödet, vilket för P_{vent} beror på ventilationssystemet. För P_{ov} beror luftflödet dels på tryckskillnaden över byggnaden skapat av P_{vent} och dels på tryckskillnaden skapat av vinden. Av vinden uppstår i vindsida ett övertryck och i läsida ett undertryck, där luft rör sig genom byggnaden i utjämnande syfte. P_{ov} beror därmed alltså av vindens variationer. Även internlasterna varierar där P_{int} bland annat beror av personantal, närvarotid, aktivitet och hur de använder utrustning som vitvaror eller belysning. P_{sol} beror av fönsternas storlek, placering, solavskärmning och transmissions-egenskaper, men även av solens effekt och infallsvinkel vilka varierar över året. Uppvärmningseffekten P_{syst} kan även varieras, hur det görs beror på valt system.

Dynamisk energiberäkning innebär att för varje tidssteg dt_i skapa en balansekvation ekv 2.2 samt beräkna P_{syst} i varje dt_i och ta hänsyn till alla variationer. I ekv 2.6 kWh summeras därefter alla P_{syst} för ett år, för att erhålla den slutgiltiga energianvändningen. Energisimulering tar hänsyn till variationer i klimat med hjälp av indata, klimatfiler för orten med registreringar i tiden av temperatur, vindens styrka och riktning. Byggnadens ortplacering, utformning och riktning tar hänsyn till solens möjligheter till instrålning.

$$\frac{dT_{luft}}{dt} c_{luft} = P_{trans}(t) + P_{ov}(t) + P_{vent}(t) - P_{int}(t) - P_{sol}(t) - P_{mass}(t) - P_{syst}(t) \quad 2.2$$

$$P_{trans}(t) = \left(\sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i + \sum_{i=1}^n \Psi_i \cdot l_i + \sum_{i=1}^n X_i \cdot N_i \right) \cdot (T_{in} - T_{ut}) \quad 2.3$$

$$P_{ov}(t) = \rho_{luft} \cdot c_{luft} \cdot q_{ov} \cdot (T_{inne} - T_{ute}) \quad 2.4$$

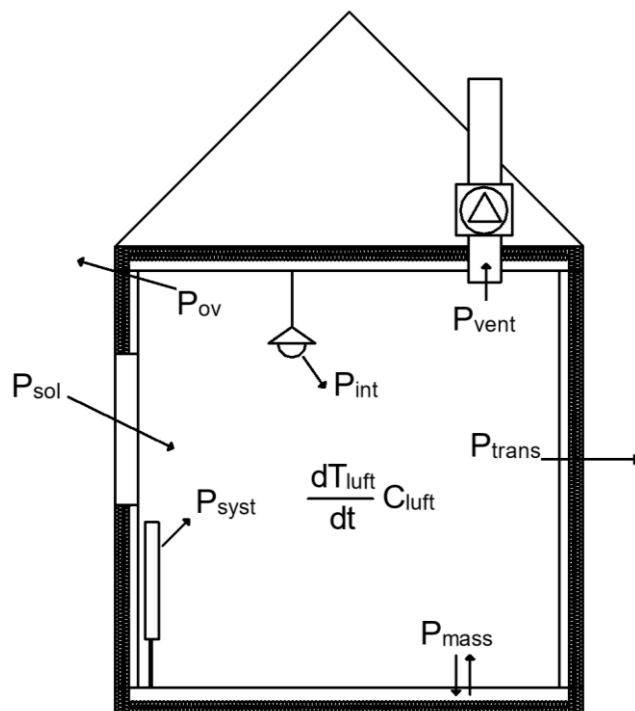
$$P_{vent}(t) = (1 - \eta) \cdot \rho_{luft} \cdot c_{luft} \cdot q_{vent} \cdot (T_{inne} - T_{ute}) \quad 2.5$$

$$E_{syst} = \sum_{i=1}^n P_{syst,i} \cdot dt_i \quad 2.6$$

Enheter för ekvationer 2.2 – 2.6 visas sammanställt i Tabell 2.1.

Tabell 2.1 förklarar beteckningarna som används för beräkning av uppvärmningsenergi med dynamisk beräkning enligt ekv 2.2 - ekv 2.5.

Beteckning	Benämning	Enhet
U_i	värmeövergångskoefficient	$W/(m^2 \cdot K)$
A_i	ytarea	m^2
Ψ_i	värmeövergång linjeköldbrygga	$W/(m \cdot K)$
l_i	längd av köldbrygga	m
X_i	punktköldbrygga	W/K
N_i	antal köldbryggor	
T_i	inomhustemperatur	$^{\circ}C$
T_u	utomhustemperatur	$^{\circ}C$
n	verkningsgrad värmeväxlare	
ρ_{luft}	luftdensitet	kg/m^3
c_{luft}	värmekapacitet luft	$J/(kg \cdot K)$
q_{vent}	ventilationsflöde	m^3/s
q_{ov}	luftläckage flöde	m^3/s



Figur 2.1 visualiserar för ett hus de ingående variablerna i momentana värmebalansen ekv 2.2.

2.1.2 Vädring i dynamisk energiberäkning

För att beräkna inverkan av vädring på byggnadens uppvärmningsenergi måste hänsyn tas till variationerna under vädringsförloppet. Variationer som beror på; när man vädrar, hur mycket man öppnar, hur länge, fönstrets placering samt fönstrets utformning. Då vädring ger ett inflöde av uteluft liknande P_{ov} , skulle den då avsiktliga ventilationen av vädring logiskt kunna representeras med addering av termen P_{av} i ekv 2.2. Där P_{av} precis som ekv 2.4 hanterar temperatur och inkommande luft med klimatfil och kvarstår gör luftflödet, vilken beskrivs i nästa del.

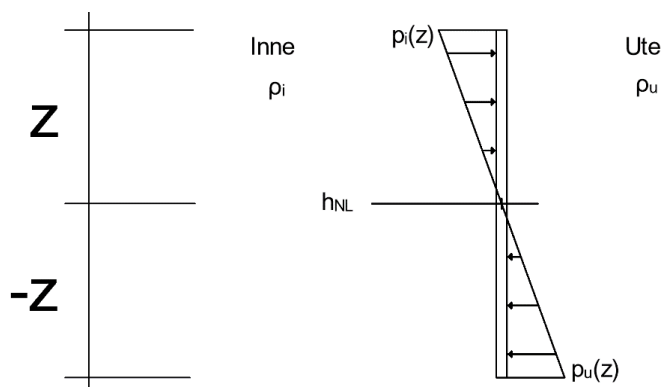
2.2 Luftflöde genom en öppning

En öppning syftar i detta arbete till att beskriva ett större fyrkantigt hål i en vägg, likt det ett fönster sedan monteras in i. Drivkraften till luftflödet genom en öppning är tryckskillnad över öppningen. Tryckskillnaden beskriver Nordquist (1998) uppkommer av vind eller temperaturskillnad, som agerar oberoende och kan undersökas enskilt. Nordquist förklarar att vind som blåser runt en byggnad ger upphov till en tryckfördelning över byggnadens fasad. Vindtrycket på byggnadens fasad beräknas från fri vindhastighet vid referenshöjd som korrigeras av en formfaktor. Formfaktorn tar i sin tur hänsyn till hastighetsförhållandet mellan fri vind och byggnad, vindriktningens vinkel, byggnadens placering i landskapet, topografi samt byggnadens geometri (Nordquist, 1998). Lufttrycket vid en viss höjd i en luftpelare beror av trycket som ovanstående luftmassa utövar, om temperatur antas konstant avtar lufttrycket linjärt med höjden över mark (Sandin, 2010). Lufttrycket approximerar Nordquist (1998) för en höjd z med ekv 2.7 och (osäkerhet $< 1 \%$) vid $\Delta h = 10$ m.

$$p_i(z) - p_i(0) \approx -g \cdot z \cdot \rho_i \quad 2.7$$

För fallet då $T_u < T_i$ över en yttervägg resulterar detta i olika luftpelare inne respektive ute, detta eftersom varm inneluft med lägre densitet verkar med mindre luftmassa. Således uppstår olika tryck för samma höjd z på var sida om väggen. För en byggnad med lufttäta golv och tak, samt otätheter i yttervägg jämnt fördelade med höjden, fås tryckfördelning enligt Figur 2.2 (Sandin, 2010). Typiskt för temperaturfallet blir då betraktat inifrån, ett resulterande undertryck vid golvet och övertryck vid taket. Övergående mellan dessa ytterligheter finns en höjd med resulterande tryck noll benämnt neutrala lagret h_{NL} , vilken lämpligen används som referenshöjd. Resultande tryckskillnad kan för höjden z från h_{NL} då ställas upp med kombination av ekv 2.7 för inne respektive ute, förenklat i ekv 2.8 (Nordquist, 1998). Tryckskillnaden kommer driva en luftrörelse genom öppningar i väggen, i syfte att utjämna densitetskillnaderna.

$$\Delta p(z) = g \cdot z(\rho_u \cdot \rho_i) = g \cdot z \cdot \Delta \rho \quad 2.8$$



Figur 2.2 visualiserar tryckfördelningen över en yttervägg med förutsättningarna beskrivna i texten ovan. Samt placeringen av neutrala lagret.

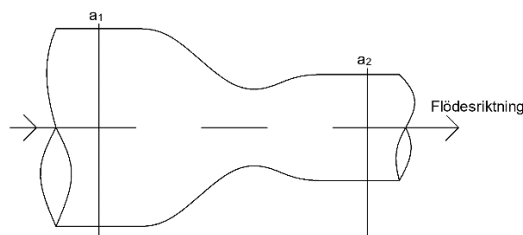
Ekvationen för luftflödet genom ett fönster visas i följande tre steg.

1. Hur förminskning av flöde kan liknas vid en öppning i en byggnadsvägg.
2. Hur koefficienter skiljer ideala och verkliga förhållanden.
3. Hur en öppning skiljs från ett fönster.

Sandberg (2006) härleder ekvation för teoretiskt flöde för ett rör i vertikalplanet med idealiserad gas, med tillämpning av Bernoullis ekvation på två sidor om en rörförminskning och villkoret att massflödet bevaras.

$$\frac{v^2}{2} + g \cdot h + \frac{p}{\rho} = \text{konstant} \quad 2.9$$

Ekv 2.9 användes då för två delar längs ett horisontellt flödesrör i Figur 2.3 uppställt i ekv 2.10:



Figur 2.3 beskriver ett rör i vertikalplanet som förminskas i flödesriktningen, samt placeringen av areorna a_1 och a_2 .

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (v_2^2 - v_1^2) = p_1 - p_2 \quad 2.10$$

Masskonserverings-villkoret ekv 2.11 omskrivet till ekv 2.12 insatt i ekv 2.10 över areakontraktion ger ekv 2.13.

$$a_1 \cdot v_1 = a_2 \cdot v_2 \quad 2.11$$

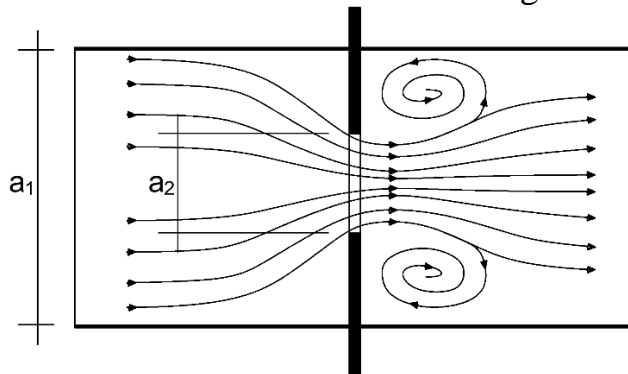
$$v_1^2 = v_2^2 \cdot \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2 \quad 2.12$$

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(v_2^2 - \left(v_2^2 \cdot \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2 \right) \right) = p_1 - p_2 \Leftrightarrow v_2^2 = \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \cdot \left(1 - \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2\right)} \quad 2.13$$

Flöde fås med insättning av hastigheten ekv 2.13 i areaflödet ekv 2.11:

$$q_{theo} = a_2 \cdot v_2 = a_2 \cdot \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \cdot \left(1 - \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2\right)}} \quad 2.14$$

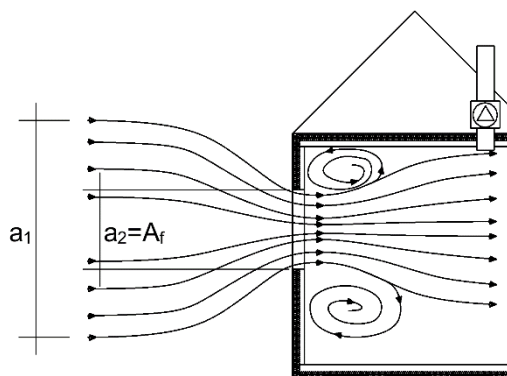
Om förminskningen i fallet Figur 2.3 varit en skarp förminskning likt i Figur 2.4 kunde en liknelse till luftflöde genom en öppning i byggnad göras.



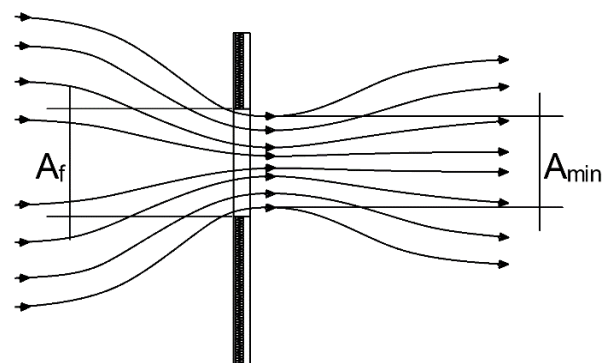
Figur 2.4 beskriver hur flödeslinjerna i vertikalplanet förändras vid flöde genom en skarpkantad förminskning.

Vädning skiljs mellan två olika typer av fall, ensidig och flersidig vädning. Ensidig vädning karaktäriseras av att en öppning finns i väggen som delar zonerna. För flersidig vädning placeras öppningar i olika, ofta motsatta väggar ibland kallat korsdrag (Nordquist, 1998). Luftflödets fördelning skiljer fallen emellan, där ensidiga fallet får ett dubbelriktat flöde med in och utflöde i samma öppning. Flersidiga fallet ger ett enkelriktat flöde där in och utflöde skiljs mellan de två öppningarna (Nordquist, 1998).

Genom att enbart betrakta inflödet för flersidig vädning, kan detta liknas vid Figur 2.4. Där luft enkelriktat flödar genom en öppning i yttervägg se Figur 2.5. Övergång i betraktelsen mellan Figur 2.3 och Figur 2.5 blir att a_1 motsvarar uteluftsflödet i Figur 2.5 som förminskas till fönstrets fria öppningsarea = $A_f = a_2$.



Figur 2.5 visar hur skarpkantad öppning i vertikalplanet kan liknas vid luftflöde genom en öppning i yttervägg i ett hus. Flödet genom öppningen är enkelriktat. Areal a_1 beskriver arean av luftflödet utomhus, arean a_2 beskriver arean av öppningen i ytterväggen = A_f .



Figur 2.6 förtydligar figur 2.5 och beskriver hur kontraktionen minskar luftflödesarean till mindre än A_f . Samt hur luftflödesarean med hänsyn till kontraktion beskrivs av A_{min} i ekv 2.15.

Kontraktionskoefficienten C_c tar hänsyn till sättet luftens strömningslinjer ändras genom öppningen, där luftflödets area blir mindre än A_f se Figur 2.6. Minsta luftflödesarean A_{min} beskrivs då relativt A_f med kontraktionskoefficient C_c ekv 2.15. A_{min} beror enligt Sandberg (2006) dels av förminskningens storlek, dels förminskningens vinkel. Från ideala förhållanden härleder Sandberg (2006) beräknade värden för C_c i en graf, för olika vinklar, beroende av areakvoten a_2/a_1 i Figur 2.5. Grafen som Sandberg visar återger det lägsta C_c , alltså störst kontraktionsförlust då $a_2/a_1 = 0$. Genom att enligt grafen överskatta kontraktionsförlusten kan ekv 2.16 förenklas till ekv 2.17 och blir då inte längre beroende av a_1 .

$$C_c = \frac{A_{min}}{A_f} \quad 2.15$$

$$q_{theo} = C_c \cdot A_f \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho \cdot \left(1 - C_c^2 \cdot \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2\right)}} \quad 2.16$$

$$q_{theo} = C_c \cdot A_f \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}} \quad 2.17$$

För att ta hänsyn till friktion i öppningen införs friktionskoefficient C_f som förhållandet mellan teoretiskt och verkligt luftflöde ekv 2.18 (Sandberg, 2006). För skarpkantad öppning härleder Benjamin M. Jones (2016) friktionens inverkan från ett "No-slip" villkor. Villkoret beskriver att luften vid fast gräns är stilla, vilket gäller för luften vid fasaden runt öppningen. Stillastående luft runt en öppning A_f verkar med friktion på flödet genom öppningen, längs kanten av A_f . Friktionen blir då beroende av omkretsen och geometrin av A_f och beskrivs med förhållandet mellan tvärsnittsarea och omkrets. Med hänsyn till friktion omskrivs ekv 2.17 med tillägg av friktionskoefficient till ekv 2.19.

$$C_f = \frac{v_c}{v_{theo}} \quad 2.18$$

$$q_{theo} = C_f \cdot C_c \cdot A_f \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}} \quad 2.19$$

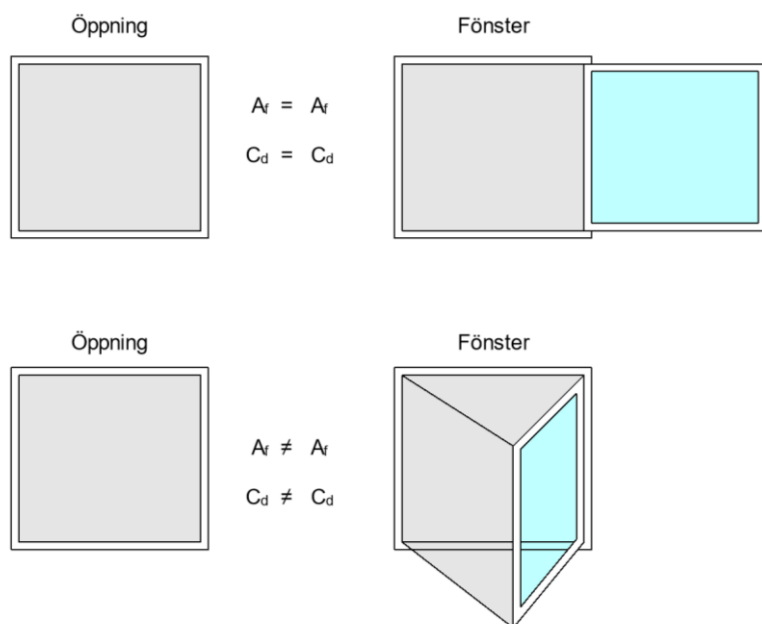
Coefficient of discharge C_d ekv 2.20 introduceras som öppningens effektivitets-koefficient. Den används för att beskriva förhållandet mellan det aktuella luftflöde och det maximala teoretiska luftflödet genom öppning (L. Fernandes, 2020). Med beaktning av kontraktion och friktion ger kombination av ekv 2.20 och ekv 2.19 ”öppningsflödes ekvationen” ekv 2.21. Det bör poängteras att användandet av ekv 2.21 blir begränsad med hänsyn till överskattningen av C_c , samt till tvådimensionella beräkningar. Vid beräkning av luftflöde genom öppningar i verkliga förhållanden används ekv 2.21.

$$C_d = C_c \cdot C_f \quad 2.20$$

$$q_{orifice} = C_d \cdot A_f \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad 2.21$$

Vid beräkningar av naturlig ventilation genom fönster är det viktigt att fastställa öppningens luftflödeseffektivitet (Per Heiselberg, 2001). För en simulering som aldrig kan bli bättre än sin indata blir C_d faktorn således ett viktigt val av indata parameter för att spegla korrekt luftflöde. Sandberg (2006) belyste att det är viktigt att skilja på C_d faktorn mellan öppning och fönster. Trots detta är det vanligt att $C_d = 0,6 - 0,65$ för just skarpkantade öppningar i litteraturen används för olika typer av fönster (Hildebrando Cruz, 2016) (L. Fernandes, 2020). Till fönsteröppningar som används i byggnader bör även tilläggas att öppningsgrad har en inverkan på flödeseffektiviteten (Hildebrando Cruz, 2016).

Undersökningen av Sandberg (2006) visade att C_d ökar med fönstrets öppningsgrad, vilken samtidigt också uttrycks med fri öppningsarea A_f . Slutsatsen blev att C_d för fönster alltså inte kan betraktas som konstant (Hildebrando Cruz, 2016) samt att konstant C_d kan leda till stora fel i uppskattning av luftflöde. Det är först när fönstret är fullt öppet och dess A_f blir nära A_f för en öppning som C_d för öppningen kan användas för fönstret (Sandberg, 2006). Detta visualiseras i Figur 2.7 nedan.



Figur 2.7 visar hur öppning och fönster förhåller sig till varandra avseende A_f och således när C_d för öppning är tillämplig även för fönster. Grå yta beskriver fria öppningsarean A_f , ljusblått representerar glaset i fönstret.

Även Caiqing Yang (2010) kom i sin undersökning fram till slutsatsen att C_d ökade med fönsters öppningsgrad. De undersökte inverkan av öppningsgrad med fönstertyp och vädringsfall på C_d faktorn. Resultatet visade att C_d faktorn generellt hade ett högre värde för flersidigt än för ensidigt vädringsfall. C_d faktor uppmätt från flersidigt vädringsfall skulle logiskt sett överskattat flödet vid tillämpning för ett ensidigt vädringsfall.

Det är möjligt att med resultat från mätning beräkna C_d faktorn för olika öppningsgrader, då mäts övriga faktorer i ekv 2.21. Detta gjorde Caiqing Yang (2010) med omskrivning av ekv 2.21 till ekv 2.22 m^3/s .

$$f(\Delta P) = A_f \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad 2.22$$

I vindtunnel för olika konstanta luftflöden och mätning av ekv 2.22 visade de relationen mellan luftflödet q och flödesförlusten $f(\Delta P)$ som proportionell $q = \zeta \cdot f(\Delta P)$. Ökande flödesresistans leder till minskat flöde samt lägre C_d , beskrev L. Fernandes (2020) förhållandet med. Förlustkoefficienten ζ beskrev då lutningen för förhållandet, där C_d faktorn ur detta beräknas med ekv 2.23.

$$C_d = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} \quad 2.23$$

Principen för vindtunnelmetoden bygger på masskonserveringen av luftflödet (L. Fernandes, 2020). Flödet i fläkten mäts och likställs då vid fönstrets, vilket kräver enkelriktat flöde. Därav kan argumenteras att uppmätta C_d faktorn från vindtunneln närmst beskriver ett flersidigt vädringsfall.

Mätningar av C_d faktorer utfördes av Heiselberg & Sandberg för ensidig vädring med olika fönsteröppningars A_f . Metoden byggde på att skapa termisk drivkraft med två separata klimatrums som delades av en vägg med ett fönster i. Där ett rum kylde till uteklimat och det andra motsvarade inneklimat. C_d värden i deras resultat relateras inte till öppningsgrad utan till $A_f \text{ m}^2$. Tillämpningen av deras C_d värden för öppningsgrad blev därför beroende av hur beräkning för A_f gjorts. I studien poängterades A_f svår att uppskatta, speciellt för små öppningsvinklar (Sandberg, 2006).

I relation till föregående stycke inskrevs i tidigare studie av Per Heiselberg (2001) med samma metod samt liknande resultat tillägget, att resultaten baserats på enkelriktat flöde genom fönstret. Resultatet kunde därav likt andra mätningar från vindtunnel mer liknas vid enkelriktat flöde, där inverkan av omblandningen som sker i gränsskiktet mellan in och utflödet benämnt interfacial mixing inte inkluderas. I Figur 2.8 exemplifieras hur interfacial mixing kan påverka lufthastigheten, med hur hastighetsfördelningen avtar inom det gråmarkerade området. h_{NL} utgör alltså inte någon avdelning mellan in och utflödet, därav kommer flödesförluster i mötet mellan flödena att finnas.

I rapport av Patrick Sharpe (2020) beskrevs att det i litteraturen existerar en tvetydighet just kring hur A_f skall beräknas för fönster som öppnas ut ur väggplanet. De utvecklade Statistical Effective Area Model (SEAM), en statistisk areaberäkningsmodell för att beskriva A_f för olika öppningsvinklar uttryckt som C_d faktor. Modellen tar hänsyn till geometri och öppningsvinkeln i ekv 2.24 - ekv 2.27. Geometriförhållandet ekv 2.27 gällde för bottenhängt fönster, men tilläts omvändas för sidohängt (Patrick Sharpe, 2020).

$$C_d(\theta) = B \cdot (1 - e^{-M\theta}) \quad 2.24$$

$$B = 0,18 \cdot e^{-0,87(\sigma)} + 0,61 \quad 2.25$$

$$M = 0,016 \cdot (\sigma + 1) \quad 2.26$$

$$\sigma = \frac{h}{w} \quad (\text{bottenhängd}) \quad 2.27$$

Detta arbete har inriktats mot ensidig vädring där tidigare nämnt flödet skiljs från flersidiga fallet, därav även beräkningen av flödet. Flödet i ensidig vädring blir dubbelriktat, där uppdelningen utgörs av h_{NL} se Figur 2.8. Flödet beskrev Nordquist (1998) med att kall uteluft trycks in under h_{NL} vilket medför att varmluft trycks ut över. Liknelse kunde göras till stycket om termiska drivkrafter med Figur 2.2. Ekv 2.8 beskrev då i stället tryckskillnaden över fönstrets botten (in) och fönstrets topp (ut) på respektive avstånd z från h_{NL} se Figur 2.8. Om antagande dels gjordes att tryckfördelningen var linjär med öppningens höjd samt $h_{NL} = H / 2$ för $A_f = H \cdot B$. Dels att rummet var slutet ifrån övrig byggnad och hade jämnt fördelade otätheter i fasaden. Visade Nordquist (1998) att luftflöde kunde fås med integrering av hastigheten över öppningsareans höjd i ekv 2.28. Där hastigheten ekv 2.29 var härledd från fri utströmning.

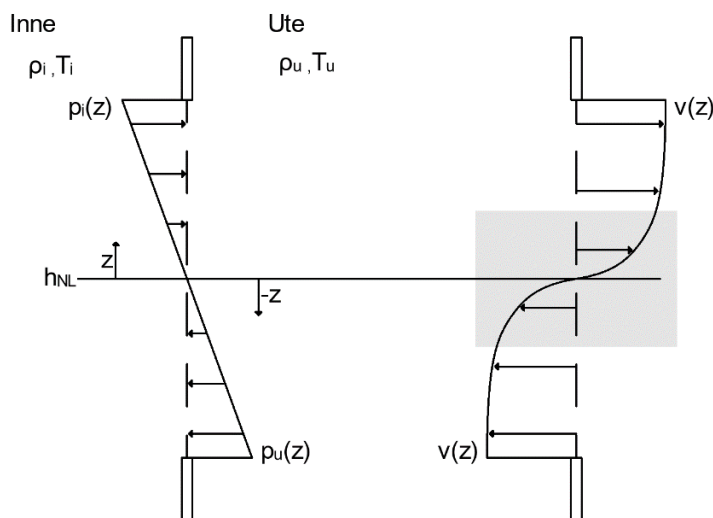
$$q = \int_{-z}^{+z} B \cdot v(z) dz \quad 2.28$$

$$v(z) = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p(z)}{\rho}} \quad 2.29$$

Luftflöderna in respektive ut för ensidiga vädringen kunde då beskrivas enligt ekv 2.30 respektive ekv 2.31:

$$q_{in} = C_D \cdot B \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta \rho \cdot g}{\rho_u}} \cdot \frac{2}{3} h_{NL}^{3/2} \quad 2.30$$

$$q_{ut} = C_D \cdot B \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta \rho \cdot g}{\rho_i}} \cdot \frac{2}{3} (H - h_{NL})^{3/2} \quad 2.31$$



Figur 2.8 visar till vänster att tryckfördelningen för en öppning i yttervägg beskrivs på samma sätt som ekv 2.8. Till höger visas hastighetsfördelningen samt det gråa område där förluster på grund av omblandning sker kallat interfacial mixing.

Nordquist (1998) beskrev tre varianter av spårgasmätning som metod för att bestämma luftutbytet, den för mätningarna i detta arbetet använda var spårgasavklingning. Metoden byggde på att en spårgas tillfördes ett rum där gashalten mättes, gashalten avtog då i takt med att luften byttes ut. Metoden ställde krav på perfekt omblandning av gasen i rumsluften, vilket uppnåddes med fläktar. För avklingningsmetoden avbröts påfyllnaden vid viss spårgashalt i rumsluften, varpå fläktarna stannades och fönstret öppnades. Luftutbytet under vädringen antogs proportionellt mot mängden spårgas som försvunnit och beskrevs som andel av rumsvolymer med ekv 2.32. Ty spårgasen C i mätfallet var CO_2 fanns möjlighet att förkorta ekv 2.32 med bakgrundsnivån $C_{bakgrund}$. Ekv 2.32 förenklades då till ekv 2.33, luftflödet q kunde därefter fås med ekv 2.34.

$$n = \frac{\ln(C_{t_{slut}} - C_{bakgrund}) - \ln(C_{t_{start}} - C_{bakgrund})}{t_{slut} - t_{start}} \quad 2.32$$

$$n = \frac{\ln(C_{t_{slut}} - C_{t_{start}})}{t_{slut} - t_{start}} \quad 2.33$$

$$q = n \cdot V \quad 2.34$$

3 Metod

3.1 Litteratursökning

Teoriavsnittet som presenteras i detta arbete är en sammanställning av den forskning som hittats inom ämnet luftflöde genom fönsteröppning. Informationen har i första hand eftersökts i Lunds universitets biblioteksdatabas LUBsearch Discovery. Motivering av valet var huvudsakligen att kunna avgränsa resultaten av litteraturunderlaget till vetenskapligt granskade artiklar, med avgränsningsfunktionen ”peer reviewed”. Databaserna som resultaten originerade från, användes i viss mån för att avgränsa sökningarna ytterligare. I en tidsaspekt användes referenser ur träffresultaten för att hitta artiklar bakåt i tiden. I LUBsearch angavs för resultat ur i databasen Scopus dels hur många gånger en artikel citerats, dels länkar till artiklarna som citerat. Med det i åtanke kunde träffresultat sökas framåt i tiden, för att ta del av nyare forskningsresultat. Söktekniker som användes var främst kombinationer av boolska operatörer och trunkeringar med sökorden;

natural ventilation, window, discharge coefficient, coefficient of discharge, opening, airing, orifice equation, energy, window opening, opening degree.

I litteraturstudien som presenterades i inledningen visades en sammanställning av det som hittades inom ämnet vädring och energi avgränsat till bostäder i Sverige. Där söktes utöver information i LUBsearch även examensarbeten i LUP student papers och Digitala vetenskapliga arkivet DiVa. Då med sökorden;

window, airing, energy, dwellings, natural ventilation, energi, vädring

3.2 Mätning och simulering

I detta kapitel presenteras inledningsvis en beskrivning av byggnaden, även en för de tidigare utförda mätningarna. Följer gör beskrivning av modellen för simuleringarna med byggnaden och metoden för återskapandet av mätningarna. Samt beskrivning av de tre modeller för beräkning av fönsteröppningars A_f som jämförs. Slutligen hur all data har använts för att kunna uppnå de resultat som presenteras.

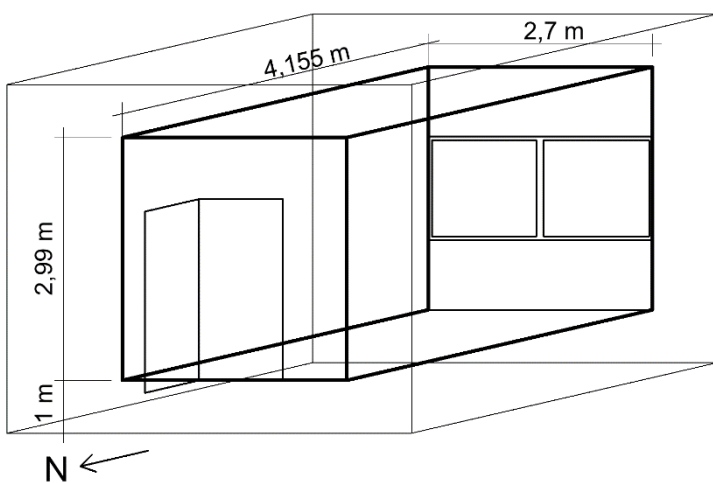
3.2.1 Byggnaden

Energi och ByggnadsDesign laboratorium Figur 3.1 uppfördes för att bedriva klimat-, energi- och solforskning vid Lunds tekniska högskola. Placerat öster om A-huset vid LTH i Lund, Sölvegatan 24, 223 62 (Akademiska-Hus, u.å).

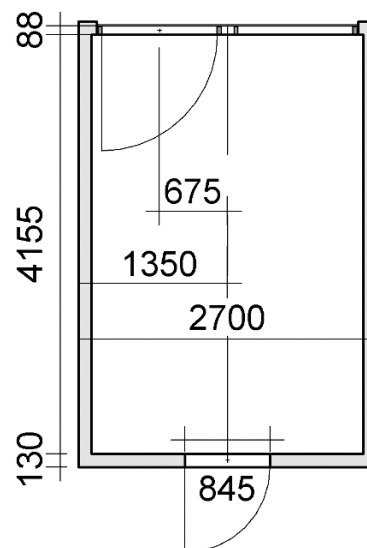


Figur 3.1 visar EBD-lab byggnaden med mätrummet på höger sida, andra närmast i bild med fönster mot syd.

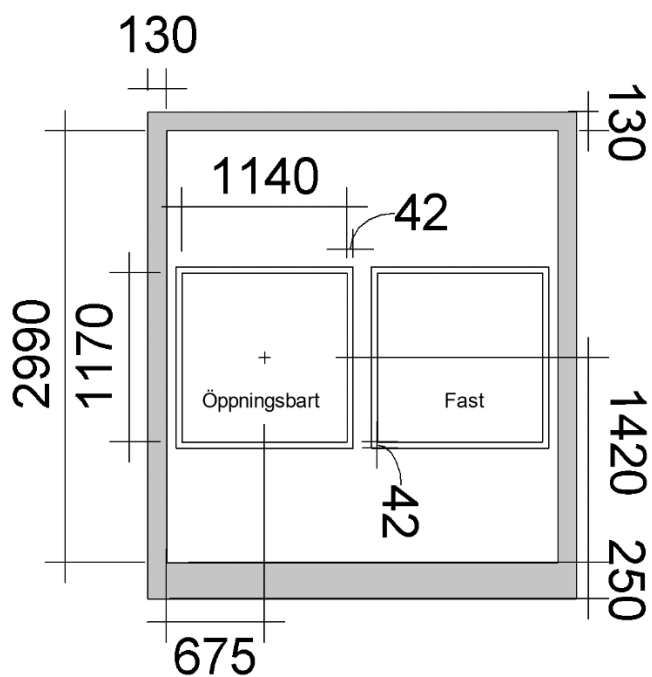
I Figur 3.2 beskrevs rummet i förhållande till övriga byggnaden i en vy ifrån byggnadens insida. Rummet omgavs av byggnadens rumsluft och anslöt endast emot utemiljö i fönsterväggen som var placerad i sydlig riktning. Planvy över rummet gavs av Figur 3.3 samt vy över fönsterväggen i Figur 3.4. I Tabell 3.1 redovisades byggnadsdelarnas areor. Rumsvolymen V beräknades till 33,55 m³.



Figur 3.2 visar rummets inre mått samt hur rummet förhåller sig till EBD-lab byggnaden. Norr pil placerad i nedre vänstra hörnet.



Figur 3.3 visar planvy med måttsättning i millimeter för fönster och dörr i rummet.



Figur 3.4 visar sektion av fönsterväggen sett inifrån, med måttsättning i millimeter.

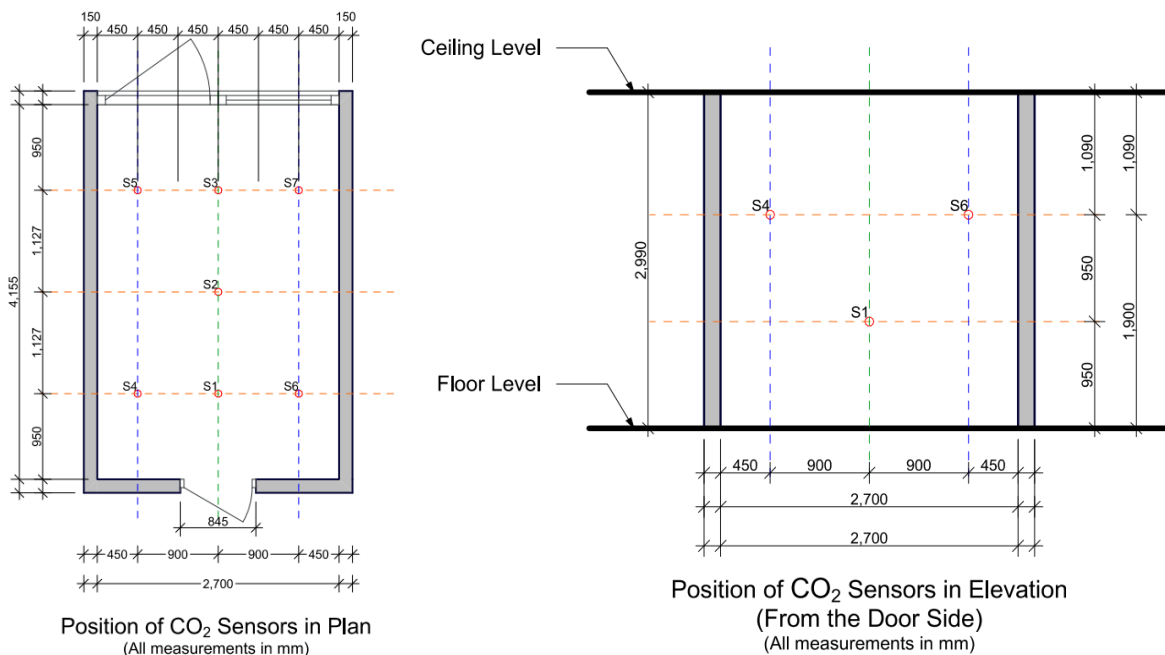
Tabell 3.1 redovisar byggnadsdelarnas areor och tjocklek.

Byggnadsdel	Area	Tjocklek
Golv	11,22 m ²	0,25 m
Tak	11,22 m ²	0,13 m
Dörrvägg	6,35 m ²	0,13 m
Innervägg	12,42 m ²	0,13 m
Fönstervägg	5,00 m ²	0,088 m
Innervägg	12,42 m ²	0,13 m

3.2.2 Mätningar

Detta arbete bygger på mätningar ifrån det ännu inte publicerade examensarbetet "Laboratory Measurements Regarding Air Change Rate for Airing" av Sidney Musinguzi. Tillgången till denna mätdata har varit en förutsättning för att kunna genomföra denna jämförelsestudie.

För spårgasmätningen användes sju sensorer vilka registrerade CO_2 ppm i tidssteg om 5 sekunder med placering enligt Figur 3.5 och Figur 3.6. Medelvärdet av de sju sensorerna bildade för varje tidssteg rumsmedelvärdet för CO_2 halten vilket visas för ett fall i Figur 3.7.



Figur 3.5 visar planvy över CO_2 sensorernas placering i rummet för beräkning av rumsmedelvärdet (Musinguzi, u.å).

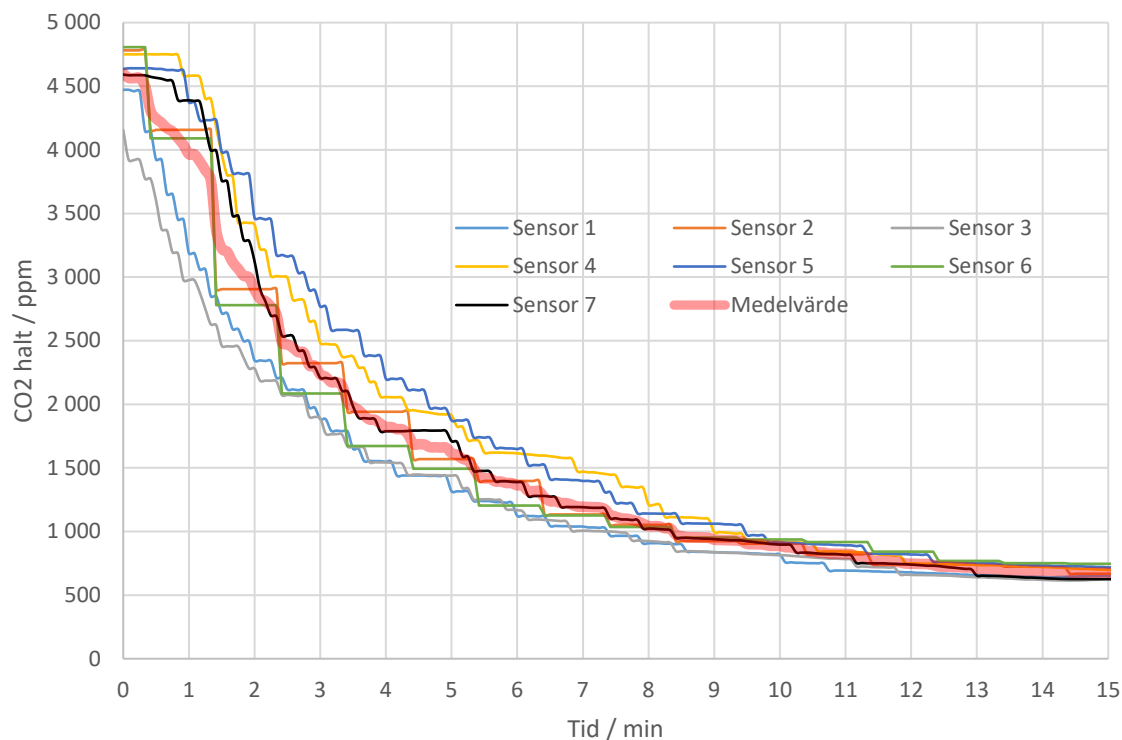
Figur 3.6 visar sektionsvy över CO_2 sensorernas placering i höjdlid för beräkning av rumsmedelvärdet (Musinguzi, u.å)

I CO₂ data från mätningen fanns värden före kalibrering mot bakgrunden. Konsekvensen av kalibreringen blev att kalibrerade värdet avtog mot noll, jämfört med att okalibrerade värdet skulle nått jämvikt med utomhushalten. Bakgrunden kunde då med fördel förkortas bort se Figur 3.8.

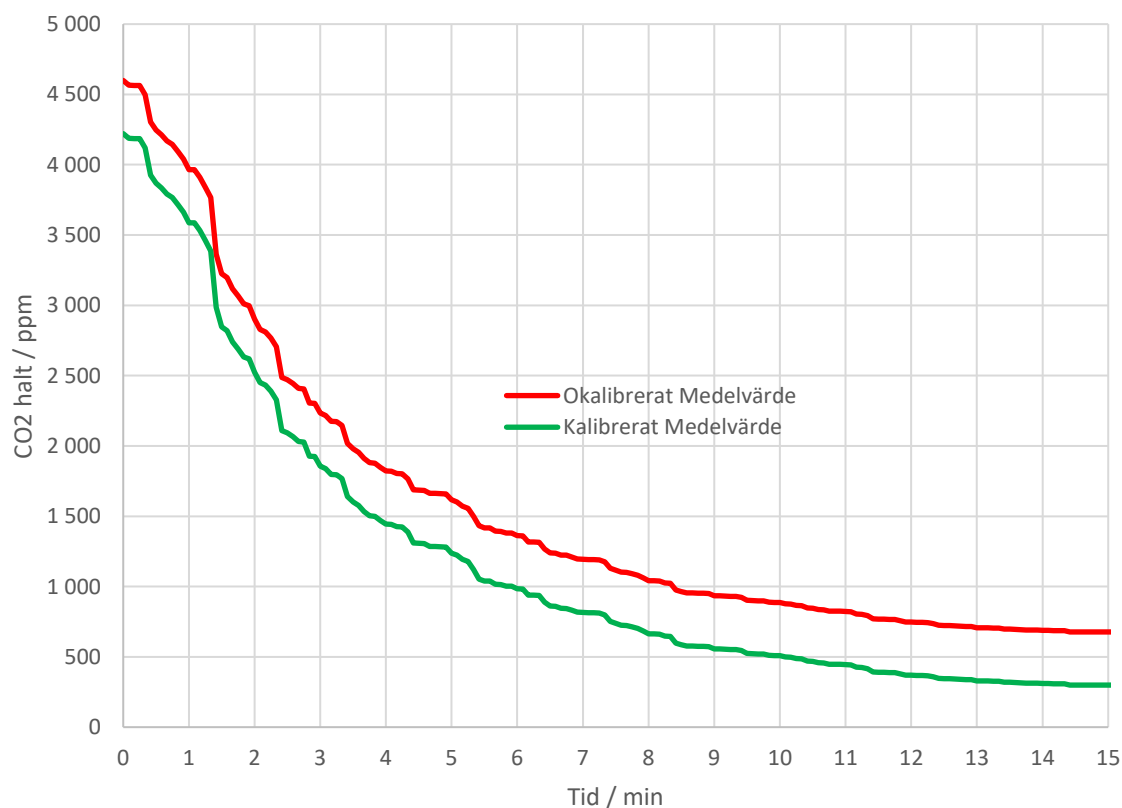
En kalibreringsmätning för sensorerna hade utförts där de loggat utomhushalten under en mätperiod om + 60 min. Med mätdata kunde utöver bakgrunden även systematiska skillnader i sensorerna kunnat kalibreras bort, med individuella kalibreringsvärden. Dock var sensorerna inte indexerade, därav kunde inte individuella kalibreringsvärden skapas. I stället valdes ur kalibrerings data, den tidsmässigt längsta gemensamma mätperioden för sensorerna. Utifrån det beräknades medelvärdet av den perioden, för varje sensor se Tabell 3.2. Utifrån alla sensorernas medelvärden bildades ett gemensamt medelvärde för att representera kalibreringsvärdet för rummets medelvärde se Tabell 3.2. Detta värde uppgick till 378 ppm och motsvarar då utomhushalten samt $C_{bakgrund}$ ekv 2.32. En sensors mätperiod frångick mätperioden av de övriga, skillnaden i medelvärdet med eller utan denna var mindre än 1 %.

Tabell 3.2 redovisar beräkningen av CO₂ kalibreringsvärdet för bakgrund och sensor, med sensorernas individuella medelvärden. Samt hur medelvärdet av sensorernas medelvärde beräknats, dels för de sensorerna med samma mätperiod, dels för samtliga sensorer.

		Sensorernas individuella medelvärden.	
Start	Slut	Gemensam period	Alla
\overline{t} hh: mm: ss	\overline{t} hh: mm: ss	CO ₂ / ppm	CO ₂ / ppm
14:32:34	15:40:24	371	371
14:32:30	15:40:20	382	382
14:32:31	15:40:21	385	385
15:58:38	16:18:13		378
14:32:30	15:40:20	379	379
14:32:32	15:40:22	388	388
14:32:30	15:40:20	359	359
Medelvärdet av sensorernas medelvärden i kolumnen		377	378

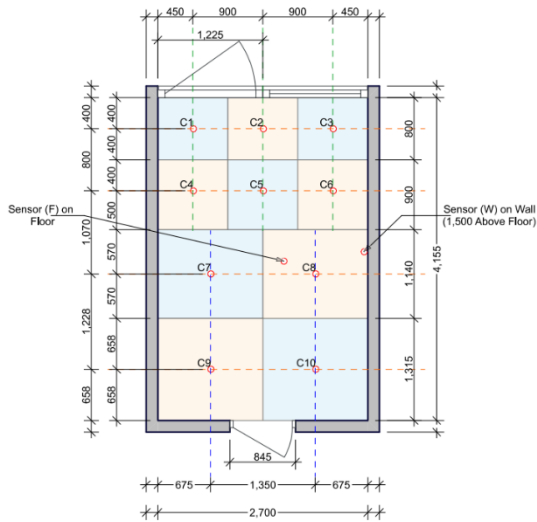


Figur 3.7 visar CO₂ sensorernas registrering för en del av mätningen 10° öppningsvinkel med okalibrerade värden samt hur det för rummet bildade medelvärdet förhåller sig till dessa. Den röda grafen motsvarar medelvärdet av de sju CO₂ sensorerna.



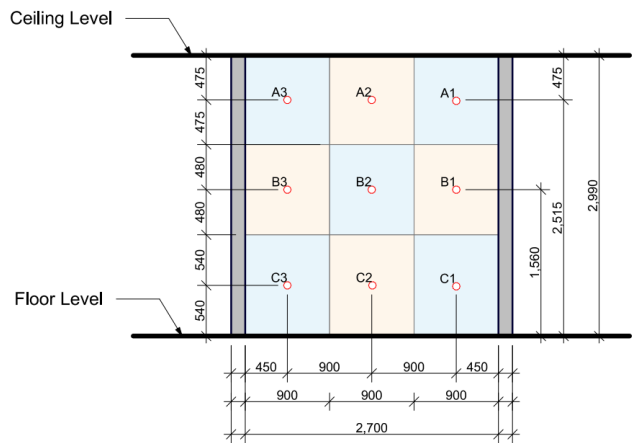
Figur 3.8 visar förändringen av rummets medelvärde för CO₂ halt före och efter kalibrering, för varje punkt i grafen utgörs skillnaden av rummets kalibreringsvärde.

Mätutrustningen för temperaturen bestod av 32 givare vilka registrerade temperaturen °C i tidssteg om 30 sekunder. Varav två givare registrerade materialtemperaturer. Temperaturgivarnas placering var enligt Figur 3.9 – Figur 3.11. Med avgränsningarna användes endast givarna i rumsluften för att bilda rummets lufttemperaturmedelvärde.



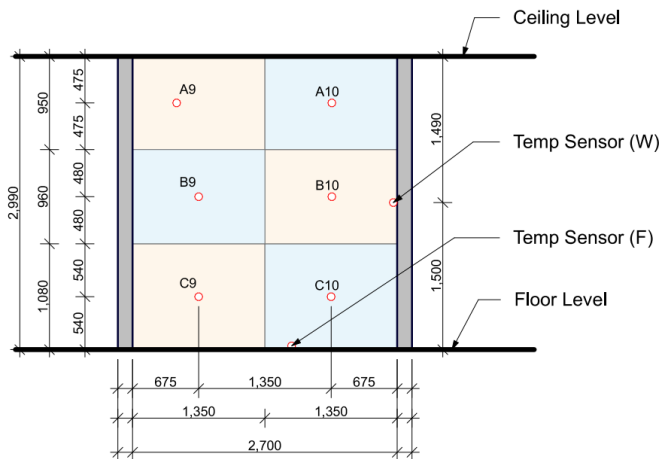
Position of Temperature Sensors in Plan
(All measurements in mm)

Figur 3.9 visar planvy över temperaturgivarnas placering i rummet för beräkning av rumsmedelvärdet (Musinguzi, u.å).



Position of Temperature Sensors in Elevation
(From the Window Side)
(All measurements in mm)

Figur 3.10 visar sektionsvy från fönstersida över temperaturgivarnas placering i höjdlager för beräkning av rumsmedelvärdet (Musinguzi, u.å)



Position of Temperature Sensors in Elevation
(From the Door Side)
(All measurements in mm)

Figur 3.11 visar sektionsvy dörrsida över temperaturgivarnas placering i höjdlager för beräkning av rumsmedelvärdet (Musinguzi, u.å).

Ur data från mätningarna skapades Tabell 3.3 som visar en sammanfattning av förloppen vilka används som indata vid modellering.

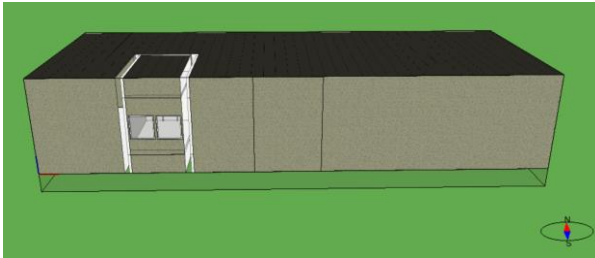
Tabell 3.3 redovisar sammanfattande informationen från utförda mätningarna, för respektive öppningsvinkel.

Startdatum	2022-07-12				
Öppningsvinkel		10°	30°	60°	90°
Starttid	t				
	hh:mm:ss	22:45:38	23:28:03	23:52:18	00:15:33
Sluttid	t				
	hh:mm:ss	23:04:58	23:36:28	00:00:13	00:22:38
Startvärde	CO ₂ / ppm	4 599	4 250	4 545	4 406
Startvärde	T / °C	35,8 °C	36,8 °C	41,4 °C	39,2

3.3 Simulering av vädring

IDA-ICE version 4.8 användes i detta arbete. Vid simulering har effektutjämnande funktioner inaktiverats, referens i detta program ”Degree of automatic schedule smoothing”. Samtliga simuleringar har haft en uppvärmningstid om 2 dagar före vädring, med syftet att byggnadens material skulle vara i jämvikt med utomhustemperaturen.

3.3.1 Modellen



Figur 3.12 beskriver modellen av rummet och hur den förhåller sig till övriga byggnad och väderstreck.

Placering uppskattades med kartverktyg online till Lund (55,713 N, 13,213 E). Utomhusförhållandena återskapades med en klimatfil ifrån mätstation på LTH med registreringar ifrån aktuella mättiden.

Antaganden gjordes om rummets konstruktion, i kombination med de valbara materialen i programvaran. Utifrån detta beräknas U -värdena enligt Tabell 3.4. Innerväggar, dörrvägg, dörr och taket antogs alla till att endast innehålla expanderad polystyren. Golvuppbbyggnaden antogs till betong med utvändigt isolering av EPS likt väggarna. Ett förenklat antagande gjordes även för fönsterväggen som i verkligheten var ett fönsterparti. Vid mätningen monterades på fönstrets insida 80 mm EPS samt en 8 mm träskiva vilket för modellen utgjorde fönsterväggen.

Värmeöverföringen mot övriga byggnaden enligt Figur 3.12 avgränsas bortsett till de korta vädringsförloppen. Det antogs att allt luftutbyte skedde genom fönstret, därav inget luftflöde genom rumsskalet eller ventilationskanaler.

Tabell 3.4 redovisar för byggnadsdelarna antagande om värmegenomgångskoefficient.

Byggnadsdel	U -värde / (W/(m ² · K))
Golv	0,2596
Tak	0,2645
Dörrvägg	0,2645
Dörr	0,2645
Innervägg	0,2645
Fönstervägg	0,4083
Innervägg	0,2645

Mätningar utfördes för fönsterkarmar och fönsterglas, varpå area och karmandel $A_{karm}/A_{fönster}$ beräknades i Tabell 3.5. Resterande information om fönsterna antogs enligt Tabell 3.6.

Tabell 3.5 beskriver uppmätta och beräknade fönsterindata för mättrummet.

Typ	Bredd	Höjd	Area	Karmandel
Fönster Fast	1,224 m	1,254 m	1,535 m ²	0,131
Fönster Öppningsbart	1,224 m	1,254 m	1,535 m ²	0,131

Tabell 3.6 redovisar antaganden om fönsternas egenskaper.

Glasuppbyggnad	g -värde	U -värde Glas	U -värde Karm	U -värde Fönster
2 glas, klart, 4-12-4	0,76	$2,9 \frac{W}{(m^2 \cdot K)}$	$2 \frac{W}{(m^2 \cdot K)}$	$2,782 \frac{W}{(m^2 \cdot K)}$
2 glas, klart, 4-12-4	0,76	$2,9 \frac{W}{(m^2 \cdot K)}$	$2 \frac{W}{(m^2 \cdot K)}$	$2,782 \frac{W}{(m^2 \cdot K)}$

3.3.2 Återskapande

För att återskapa mätningen krävdes tidstyrning av fönsteröppningen, CO₂ halten och temperaturen vilket presenterades översiktligt i Tabell 3.7. Det poängteras att simuleringarna gjordes enskilt för varje öppningsgrad, alltså skedde ingen överlappning. Tiderna för fönstermanövreringen användes direkt ur Tabell 3.3. CO₂ halten utgjordes av två delar, vilka reglerades enskilt. Dels laborantens inverkan under vädringsmätningen, för vilket samma tider ur Tabell 3.3 användes. Dels den spårgaspåfyllnad som gjordes precis innan vädringsmätningen påbörjades. I simuleringen tidigarelades denna för att enklare kunna variera lasten. Efter testsimulering återgavs inomhustemperaturer, för vilket höjning krävdes med värmelast. Laborantens närvaro under mätningen komparerades med värmeavgivning.

Tabell 3.7 redovisar tidsschema för de aktiviteter som sker under simuleringen i syfte att representera mättillfället.

Öppning svinkel	CO ₂		Värme		Vädring & Laborant	
	Start	Slut	Start	Slut	Start	Slut
	t	t	t	t	t	t
	hh:mm:ss	hh:mm:ss	hh:mm:ss	hh:mm:ss	hh:mm:ss	hh:mm:ss
10°	20:00:00	22:00:00	22:40:38	22:45:38	22:45:38	23:04:58
30°	21:00:00	23:00:00	23:23:03	23:28:03	23:28:03	23:36:28
60°	21:00:00	23:00:00	23:48:18	23:52:18	23:52:18	00:00:13
90°	21:00:00	23:00:00	00:10:33	00:15:33	00:15:33	00:22:38

Laborantens inverkan i CO₂ halten komparerades med närvaron av en person i rummet under simulering, vilket visade inverkan till 8,5 mg / s. Tillförsel av CO₂ för spårgasen gjordes även i mg / s, denna beräknades som mellanskillnad av utomhushalten och startvärdet ppm Tabell 3.3. Utomhushalten återgavs i programmet till 608 mg / kg, samt densitet till 1,2 kg / m³. Beräkning i ppm gjordes med ekv 3.1 samt molvikt 44,01 gram.

Spårgasen i mg / s beräknades omvänt med ekv 3.1 samt ekv 3.2. Vid simulering upptäcktes att visst luftläckage kvarstod i rummet. Mängden CO₂ läckage i rummet berodde av tidsdifferensen mellan påfyllnad och vädringsstart. Iterativ räkning med ekv 3.1 och ekv 3.2 användes baserat på mellanskillnaden av år och bör-värdet i ppm.

$$(\text{ppm}) = 24,45 \cdot \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right) \cdot (\text{molvikt CO}_2) \quad 3.1$$

$$\left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right) = (\text{s}) \cdot \left(\frac{\text{mg}}{\text{s}}\right) \cdot (\text{m}^{-3}) \quad 3.2$$

Temperaturhöjningens effekt W utgick från ekv 3.3 och beräknades iterativt. Simulering visade att denna temperaturhöjning ökade tryckskillnaden över klimatskalet och således även luftläckaget. Med hänsyn till detta placerades därför temperaturhöjningen precis innan mätningens start. I ekv 3.3 användes $c_{luft} = 1000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ samt $\rho_{luft} = 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$.

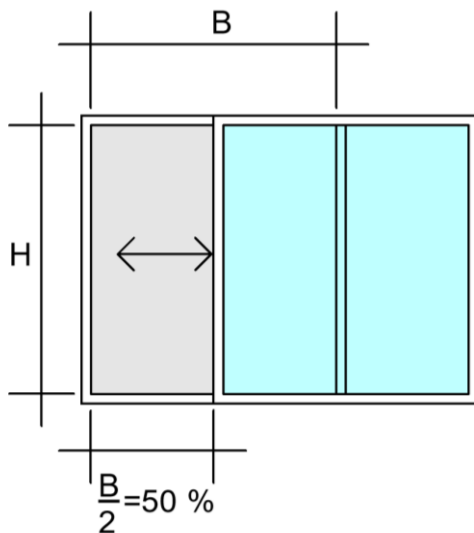
$$P = \Delta T \cdot c_{luft} \cdot \rho_{luft} \cdot V_{rum} \cdot s^{-1} \quad 3.3$$

Värmeeffekten av laborantens närvaro i rummet under mätningen kompenenserades enligt programmet med 36,6 W.

C_d faktorn = 0,65 var programmets standardvärde, ett antagande gjordes att använda detta. Eftersom det var svårt att motivera användandet av annat värde, ty valet enligt teori delvis berodde på A_f .

3.3.3 Metoderna för fönsteröppning

Regleringen av fönsteröppningen angavs i programmet procentuellt. I programkoden gjordes tolkningen att endast fönstrets bredd varierade, vilket kunde liknas av ett skjutfönster som skjuts i sidled för variation av öppningens bredd. Vid 50 % öppet fönster var således öppningens bredd 50 % av maximala öppningens bredd Figur 3.13. Manövreringen skedde till skillnad från i verkligheten momentant, därav fanns ingen övergångstid mellan öppet och stängt läge.



Figur 3.13 visar illustrerad tolkning av programmets beräkningsmodell för fönsteröppningens area.

3.3.3.1 Linjär

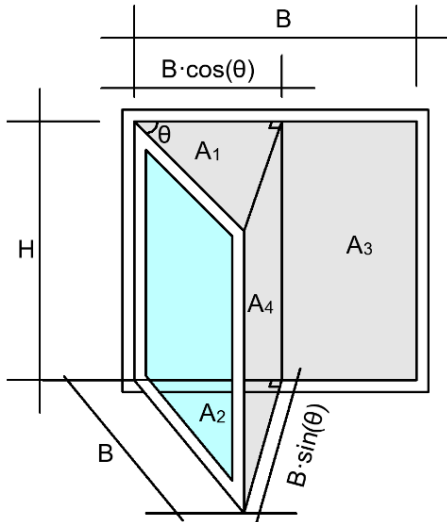
I den första simuleringen användes beräkningsmodellen Linjär som beskrev fönsterbredden relativt öppningsvinkeln. Fönsteröppningens bredd vid öppningsvinkel 90° motsvarade 100 %, därefter linjärt avtagande. Vid öppningsvinkel 45° var således skjutfönstret 50 % öppet. För Linjär visades den relativa fönsterbredden med tillhörande öppningsarea, för aktuella öppningsvinklar i Tabell 3.8.

Tabell 3.8 visar Linjära modellen med öppningsvinklar och korresponderande indata i form av relativ bredd, bredden refererar till skjutfönstermodellen.

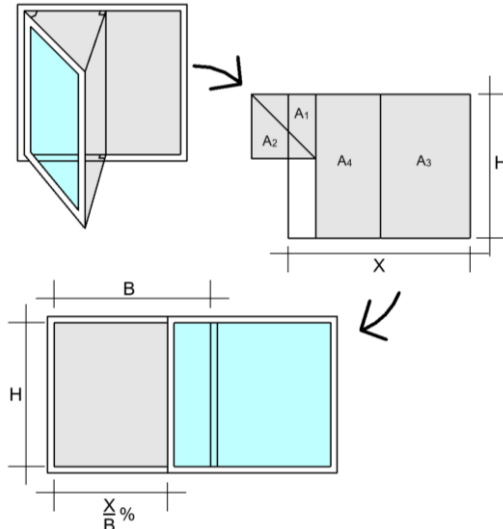
Öppningsvinkel	A_f	Relativ bredd
90°	1,535 m ²	100 %
60°	1,023 m ²	66,667 %
30°	0,512 m ²	33,333 %
10°	0,171 m ²	11,111 %

3.3.3.2 Beräkнад

I andra simuleringen, beräkningsmodell Beräkнад togs även hänsyn till areorna ut ur väggplanet enligt Figur 3.14. Enligt ekv 3.4 blev A_f summan av areorna A_1 till A_4 , dock begränsat till max $B \cdot H$. A_f blev därav aldrig större än vid fullt öppet fönster. Areorna i Figur 3.14 beräknades med ekv 3.5 – ekv 3.7.



Figur 3.14 visar illustration av areamodell "Beräkнад" för fönsteröppningens area.



Figur 3.15 visar illustrerad anpassning av öppningsarea ut ur planet till "skjutfönster".

$$A_f = \min(B \cdot H; A_1 + A_2 + A_3 + A_4) \quad 3.4$$

$$A_1 + A_2 = B^2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \quad 3.5$$

$$A_3 = (B - B \cdot \cos \theta) \cdot H \quad 3.6$$

$$A_4 = B \cdot \sin \theta \cdot H \quad 3.7$$

A_f för varje öppningsvinkel uttrycktes därefter med en relativ bredd, i syfte att liknas vid skjutfönstret för att kunna regleras i modellen. Illustrerat visades detta i Figur 3.15.

Tabell 3.9 visar modellen Beräkнад med öppningsvinklar och korresponderande indata i form av relativ bredd, bredden refererar till skjutfönstermodellen.

Öppningsvinkel	A_f	Relativ bredd
90°	1,535 m ²	100 %
60°	1,535 m ²	100 %
30°	1,535 m ²	100 %
10°	0,546 m ²	35,576 %

3.3.3.3 SEAM

I tredje simuleringen användes SEAM som beräkningsmodell för A_f . I indata för denna modell antogs skjutfönstret vara fullt öppet. Relativt det fullt öppna fönstrets luftflöde, beskrevs luftflödet för respektive öppningsvinkeln med justering av förlusten för öppningsvinkeln. Beräkning av C_d faktorn gjordes med ekv 2.24 – ekv 2.27 från teoriavsnittet. Beräknade C_d värden presenteras i Tabell 3.10.

$$C_d(\theta) = B \cdot (1 - e^{-M\theta}) \quad 2.24$$

$$B = 0,18 \cdot e^{-0,87(\sigma)} + 0,61 \quad 2.25$$

$$M = 0,016 \cdot (\sigma + 1) \quad 2.26$$

$$\sigma = \frac{B}{H} \quad (\text{sidohängt}) \quad 2.27$$

Tabell 3.10 visar SEAM modellen med öppningsvinklar och korresponderande indata i form av värden på C_d faktorer, vilka tillämpas med full öppningsarea.

Öppningsvinkel	C_d
90°	0,65374036
60°	0,589948162
30°	0,425244538
10°	0,188138117

3.3.4 Postprocessering

Simuleringarna gjordes i tidssteg om 5 sekunder i enlighet med CO₂ registreringarna från mätningen. Utdata ifrån simuleringarna återgavs som medelvärdet av rummets både CO₂ halt och temperatur. Eftersom tidssteget i temperaturmätning var 30 sekunder, matchades detta med bildning av medelvärden i 30 sekunders intervaller för simuleringarna. Separata sammanställningar gjordes för CO₂ och temperatur för varje öppningsgrad. CO₂ data från mätning och simuleringssresultat sammanställdes i jämförelse enligt principen i Tabell 3.11. I tabellen gjordes för alla värden ett avdrag med medelvärdet från kalibreringsmätningen 378 ppm, vilket visades i Figur 3.8. Grafer bildades ur tabellerna dels för alla mätningar se Figur 4.1, dels för simulering och mätning vid varje enskild öppningsgrad se Figur 4.2 – Figur 4.5.

Mängden omsatt luft i tiden beräknades i tidssteg om 30 sekunder med ekv 2.33 samt rumsvolymen. Detta med $t_{start} = t$ och $t_{slut} = t + 30s$ samt addering av den vid tiden $t_{start} = t$ redan omsatta mängden luft. Se Tabell 4.1 samt grafer i Figur 4.6 – Figur 4.9. Kontroll utfördes för hela mätförloppet med $t_{start} = t_{start}$ samt $t_{slut} = t_{slut}$.

Tabell 3.11 visar principen för jämförelsetabell av rummets CO₂ medelvärde mellan mätning och simuleringar i tiden.

Öppningsvinkel 10°					
Datum 2022-07-12					
Logg	Tid	Mätning	Linjär	Beräknad	SEAM
	t hh:mm:ss	CO ₂ / ppm	CO ₂ / ppm	CO ₂ / ppm	CO ₂ / ppm
1	22:45:38	4221	4221	4162	4178
2	22:45:43	4188	4203	4134	4109
...
233	23:04:58	226	2014	533	740

Luftflödet för varje tidssteg, beräknades på liknande sätt $t_{start} = t$ samt $t_{slut} = t + 5s$ i ekv 2.33 i kombination med ekv 2.34. Ur tabellen bildades för luftflödet medelvärden för ett 60 sekunders intervall, vilket visas i Figur 4.10 – Figur 4.13. Övergripande sammanställdes ”medelluftflödet” som medelvärdet av mätningens respektive simuleringarnas luftflöde för hela mätperioderna i Tabell 4.1.

Syftet med grafernas medelvärdesbildningar var att uppvisa variationerna i luftflödet och luftomsättningen, samtidigt som utjämnningen bidrog till lättare tolkningar. Medelvärdenas tider för luftomsättning och luftflöde testades fram och var således inte förutbestämda.

Ur temperaturdata från mätningen bildades rumsmedelvärdet ur de 30 givarna i inomhusluften, vilka representerade kolumnen mätning enligt princip i Tabell 3.12. Utifrån principen i Tabell 3.12 sammanställdes graferna i Figur 4.14 – Figur 4.17 för simulering och mätning.

Tabell 3.12 visar principen för jämförelsetabell av rummets medeltemperatur mellan mätning och simuleringar i tiden.

Öppningsvinkel 10°					
Datum 2022-07-12					
Logg	Tid	Mätning	Linjär	Beräknad	SEAM
	t				
	hh:mm:ss	$T / ^\circ\text{C}$	$T / ^\circ\text{C}$	$T / ^\circ\text{C}$	$T / ^\circ\text{C}$
1	22:45:38	35,8	35,8	35,8	35,8
2	22:46:08	34,8	35,6	35,2	35,1
...
40	23:05:08	30,2	30,4	28,8	28,4

I kapitel 2.1.1 beskrevs hur effektförlusten på grund av vädring kunde betraktas som term i dynamisk energiberäkning P_{av} . Medelluftsflödena ur resultatkapitels Tabell 4.1 användes för att förenklat uppskatta och jämföra inverkan i uppvärmningsenergi. Två modeller av energiberäkningar utfördes med ekv 2.35 för E_{av} Wh, där Mätning jämfördes med SEAM och Beräknad. Beräkningar gjordes utan variation i tiden, dock gjordes dels en beräkning med tre olika utomhus temperaturer, dels en med tre olika vädringstider.

Förutsättningarna för beräkningarna förenklades till

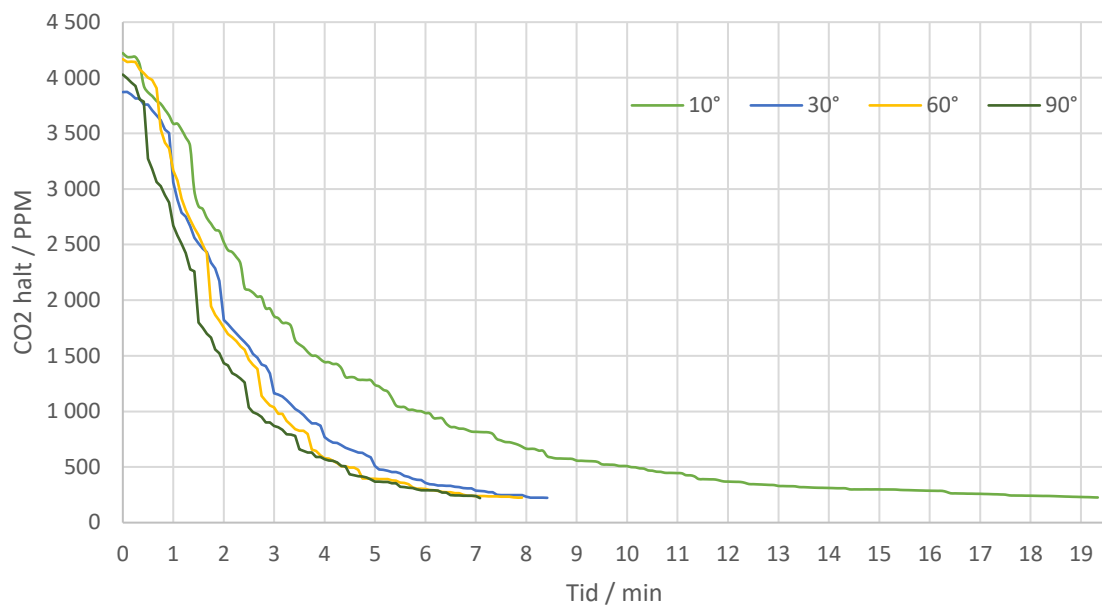
$$\rho_{luft} = 1,3 \text{ kg/m}^3, T_{inne} = 20 \text{ }^\circ\text{C}, c_{luft} = 1010 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}).$$

T_{ute} varierades mellan 10 °C, 5,0 °C, 2,4 °C, vilket i respektive ordning för året 2022 i Lund motsvarade medelvärdet för intervallen, hela året,

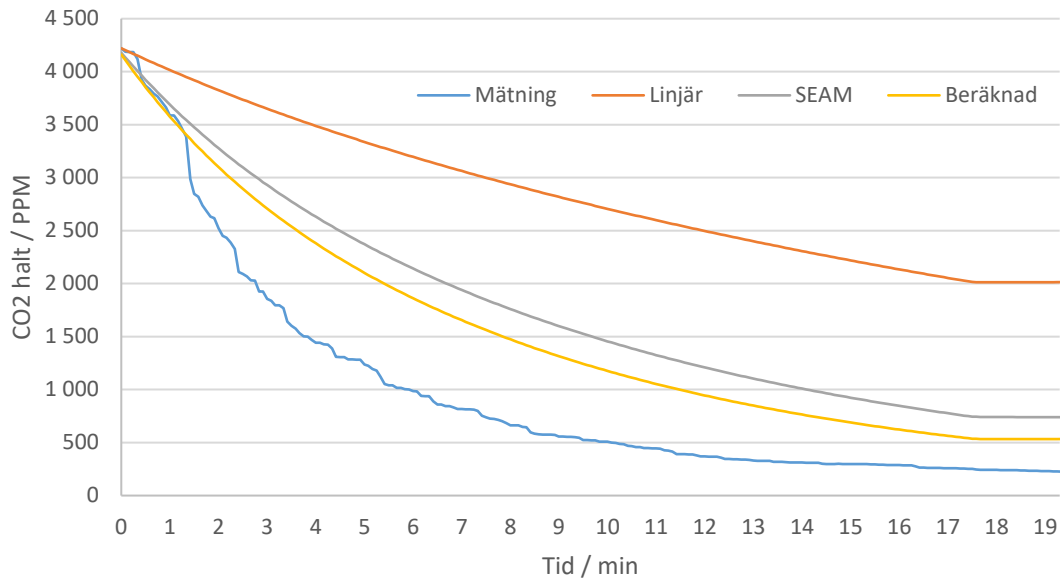
November – Mars samt December – Feb (SMHI, u.å). Temperaturerna valdes för att representera utomhusförhållanden under uppvärmningssäsong.

$$E_{av} = \rho_{luft} \cdot c_{luft} \cdot q_{av} (T_{inne} - T_{ute}) \cdot \frac{t}{3600} \quad 2.35$$

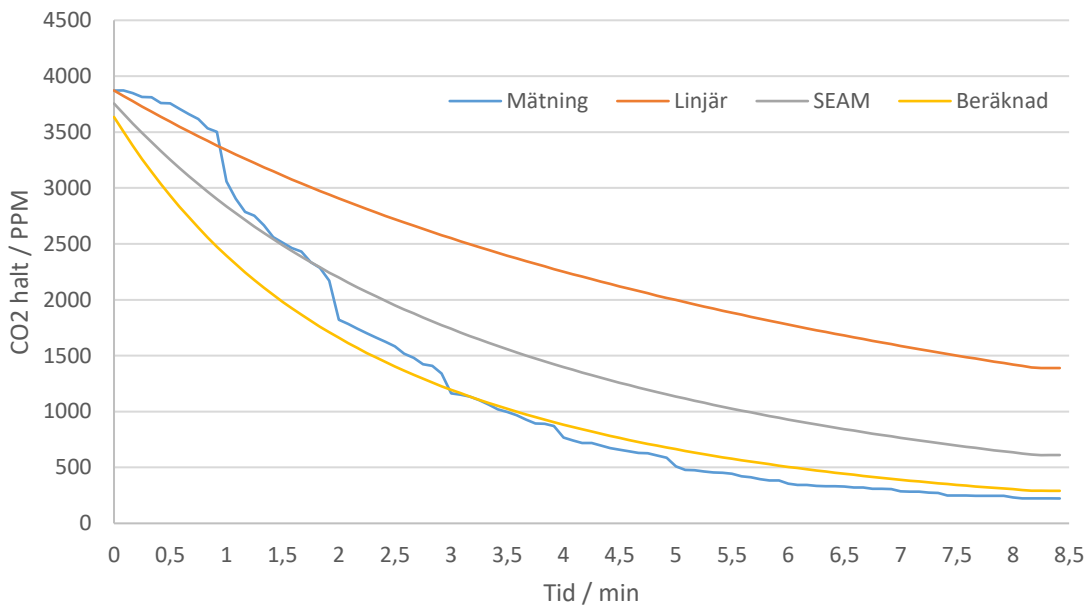
4 Resultat



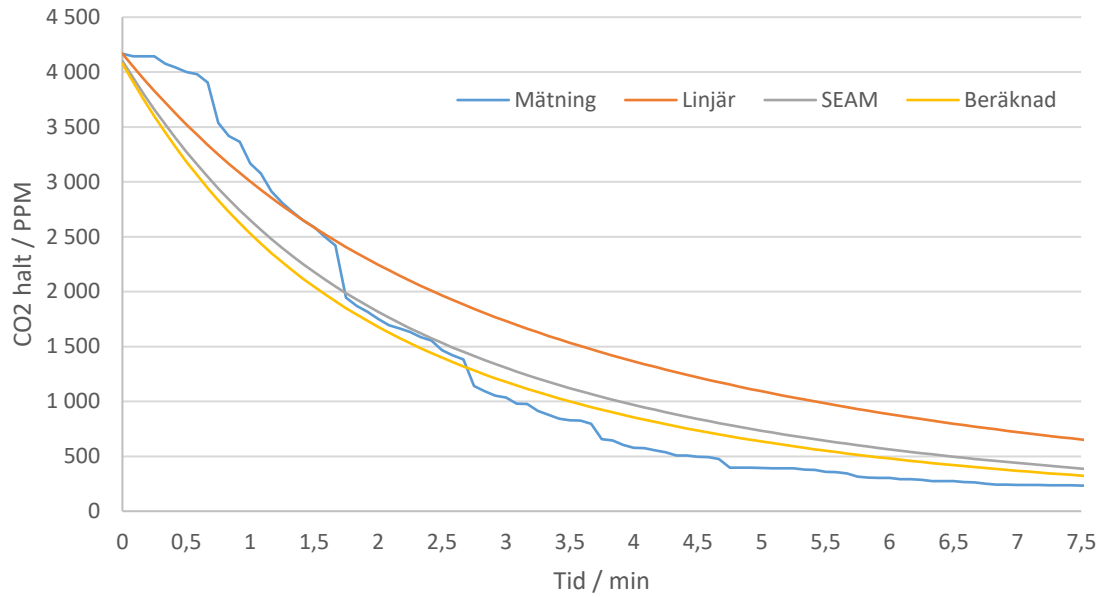
Figur 4.1 visar från mätillfället spårgasavklingningen med CO₂ halt i tiden. Grafernas färger skiljer de olika öppningsvinklarna.



Figur 4.2 visar spårgasavklingningens CO₂ halt för mätning och simuleringar från öppningsvinkeln 10°.

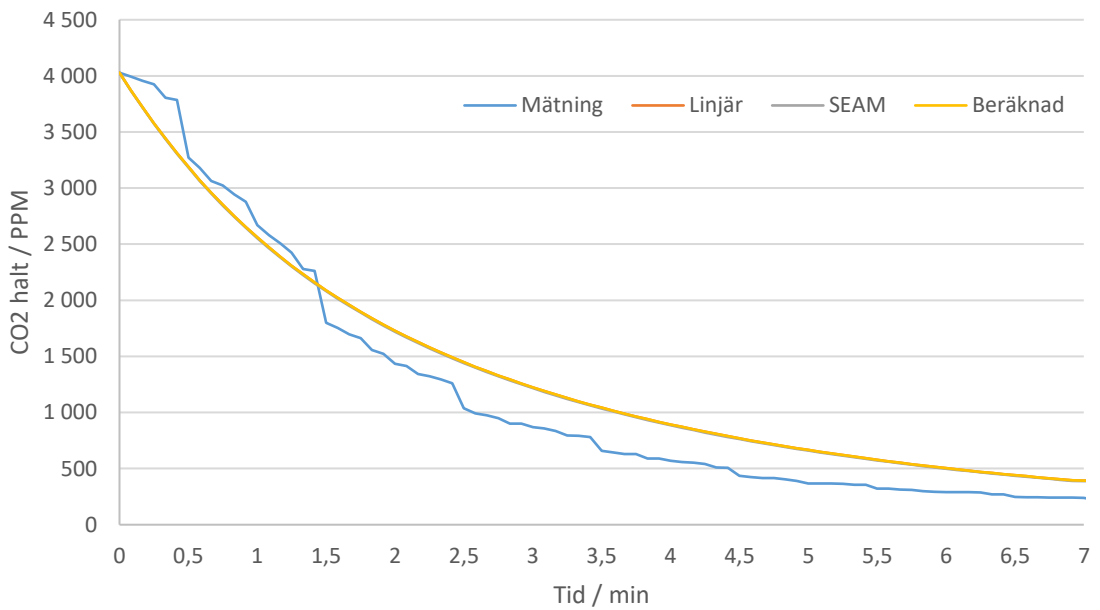


Figur 4.3 visar spårgasavklingningens CO₂ halt för mätning och simuleringar från öppningsvinkeln 30°.



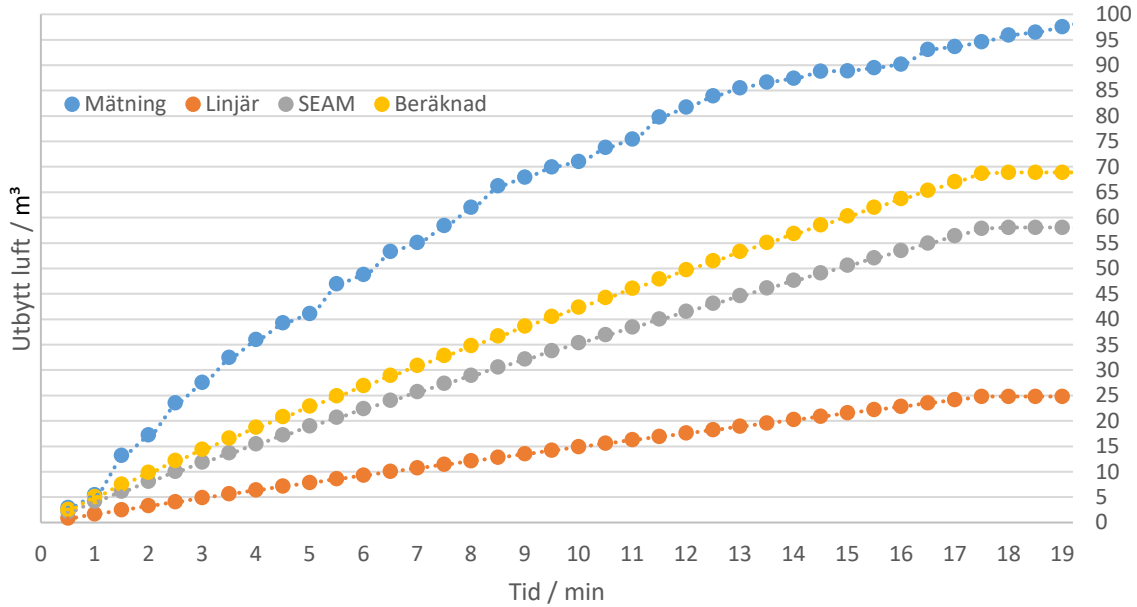
Figur 4.4 visar spårgasavklingningens CO_2 halt för mätning och simuleringar från öppningsvinkeln 60° .

I Figur 4.5 följde samtliga simuleringssgrafer varandra därav syns endast en av dem.

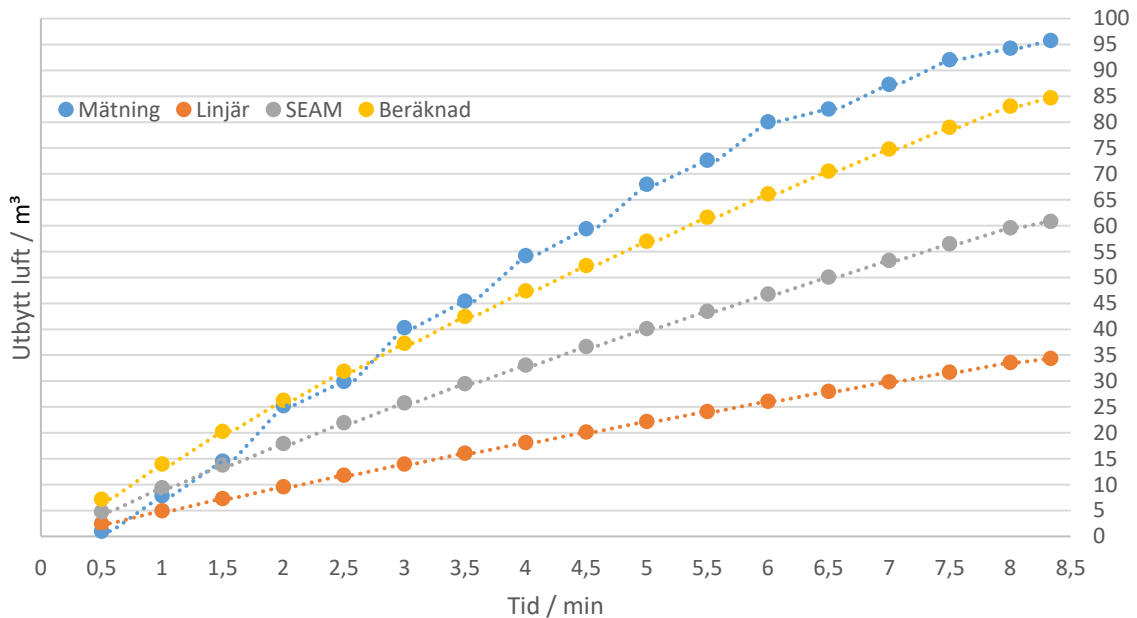


Figur 4.5 visar spårgasavklingningens CO_2 halt för mätning och simuleringar från öppningsvinkeln 90° .

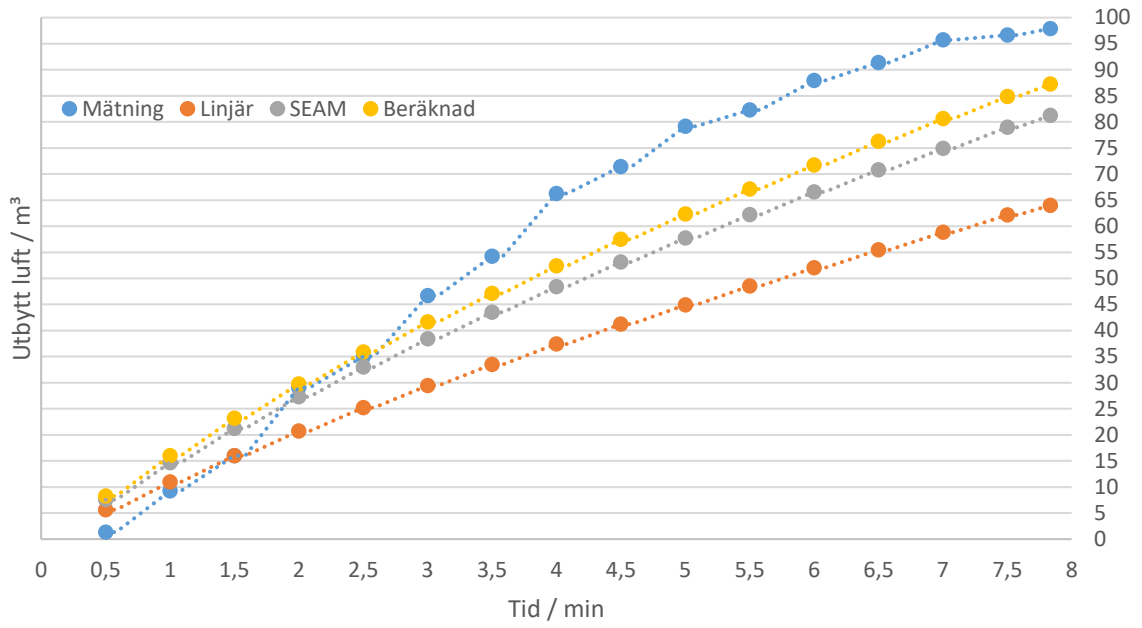
Rummets luftutbyte i tiden presenterades i Figur 4.6 – Figur 4.9. Punkten längst till höger i diagrammet motsvarade totalt utbytt mängden luft i m³ för vädringen. Det poängteras att den prickade linje som sammanbinder mätpunkterna för luftutbytet inte antar värden, de användes endast för att underlätta tolkningen av graferna.



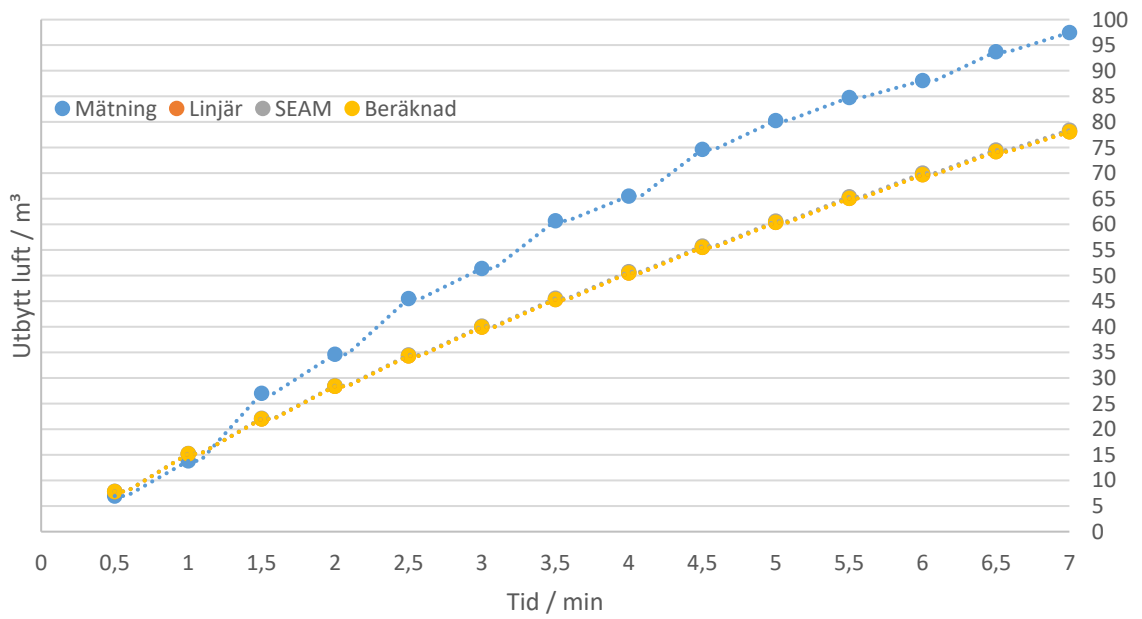
Figur 4.6 visar luftutbytets fördelning under vädringsförloppet för öppningsvinkel 10°.



Figur 4.7 visar luftutbytets fördelning under vädringsförloppet för öppningsvinkel 30°.



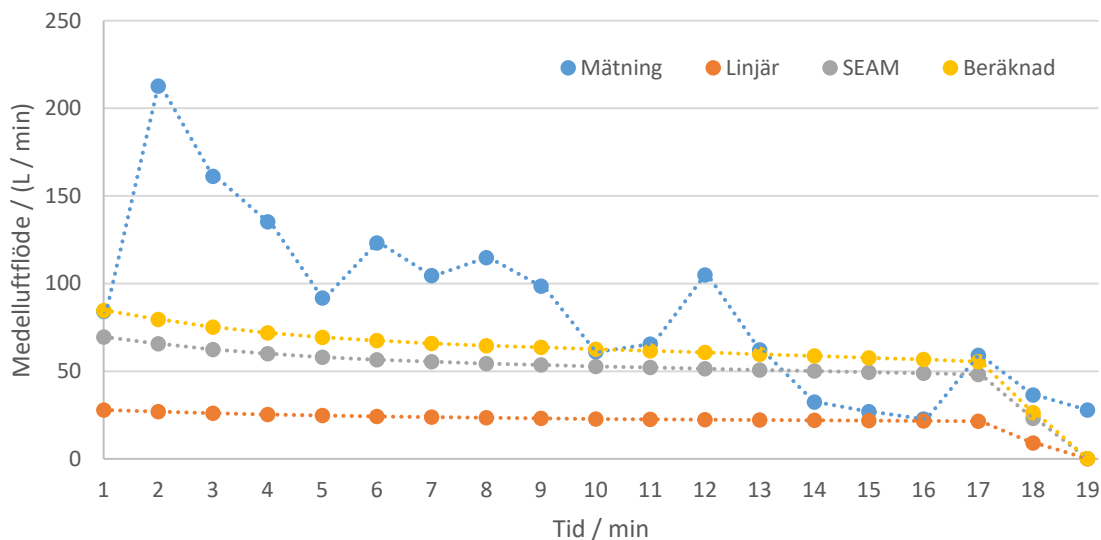
Figur 4.8 visar luftutbytets fördelning under vädringsförloppet för öppningsvinkel 60°.



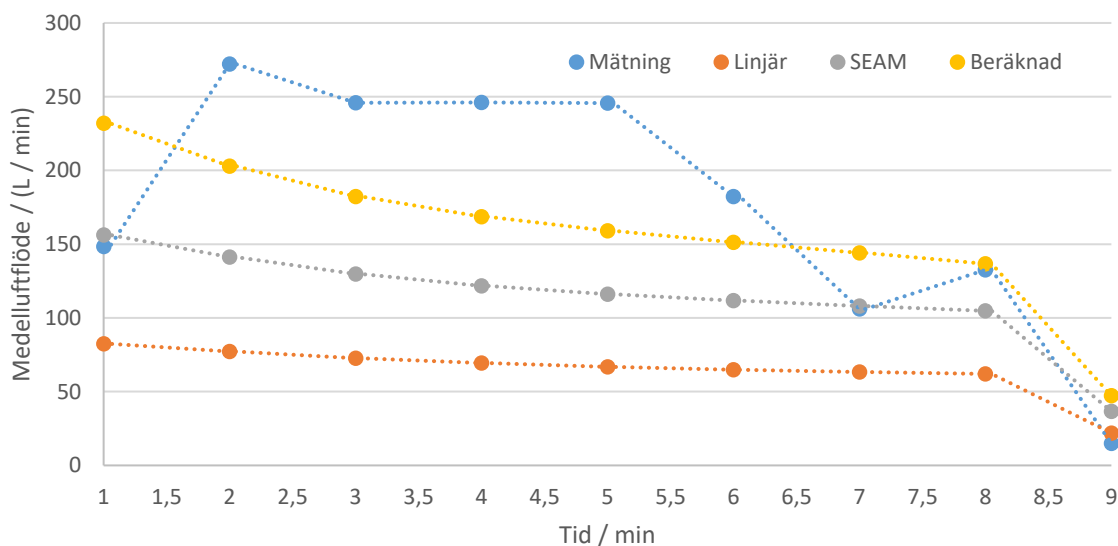
Figur 4.9 visar luftutbytets fördelning under vädringsförloppet för öppningsvinkel 90°.

Tabell 4.1 visar medelluftflödet för hela förloppet för alla mätningar och simuleringar. Indelning har gjorts efter öppningsvinkel.

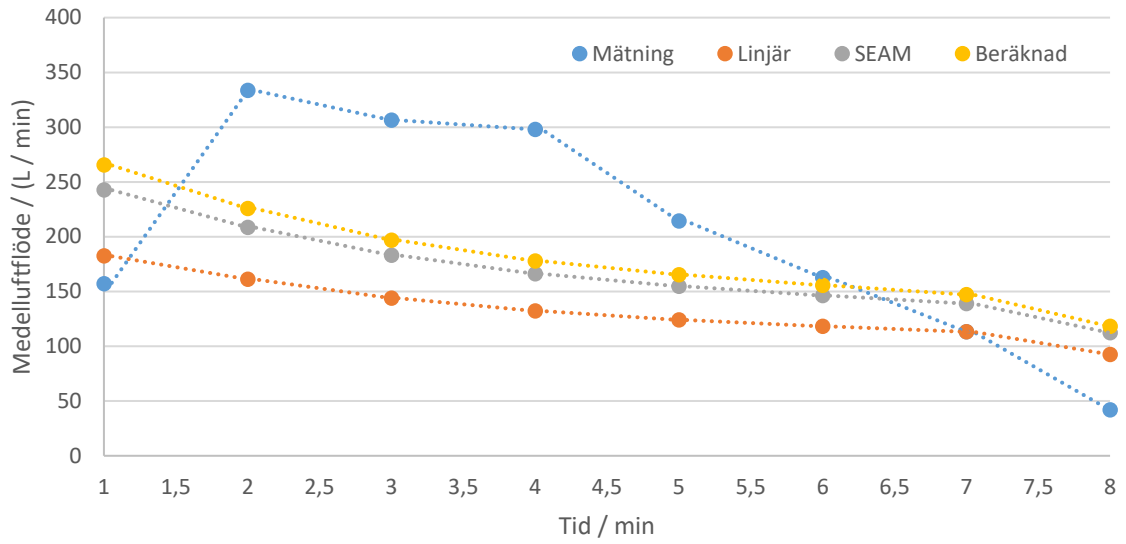
Öppningsvinkel	10°	30°	60°	90°
	$q / (l/s)$	$q / (l/s)$	$q / (l/s)$	$q / (l/s)$
Mätning	84,6	189,7	206,1	229,3
Linjär	21,4	68,1	134,8	183,7
SEAM	50,1	120,6	171,0	184,5
Beräknad	59,4	167,8	183,7	183,7



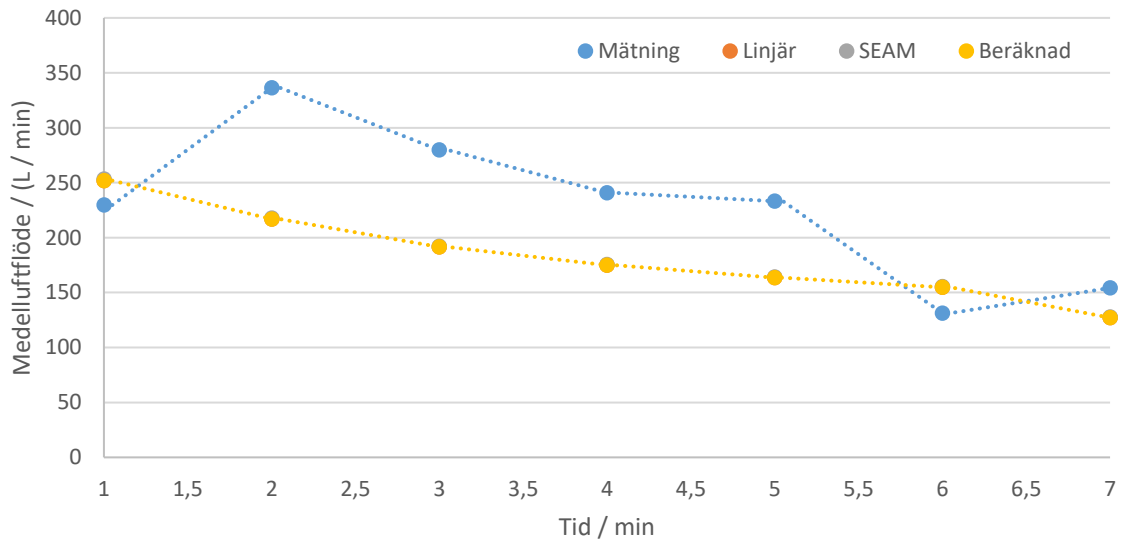
Figur 4.10 visar spårgasmätningens luftflödes variation i tiden för öppningsvinkel 10°.



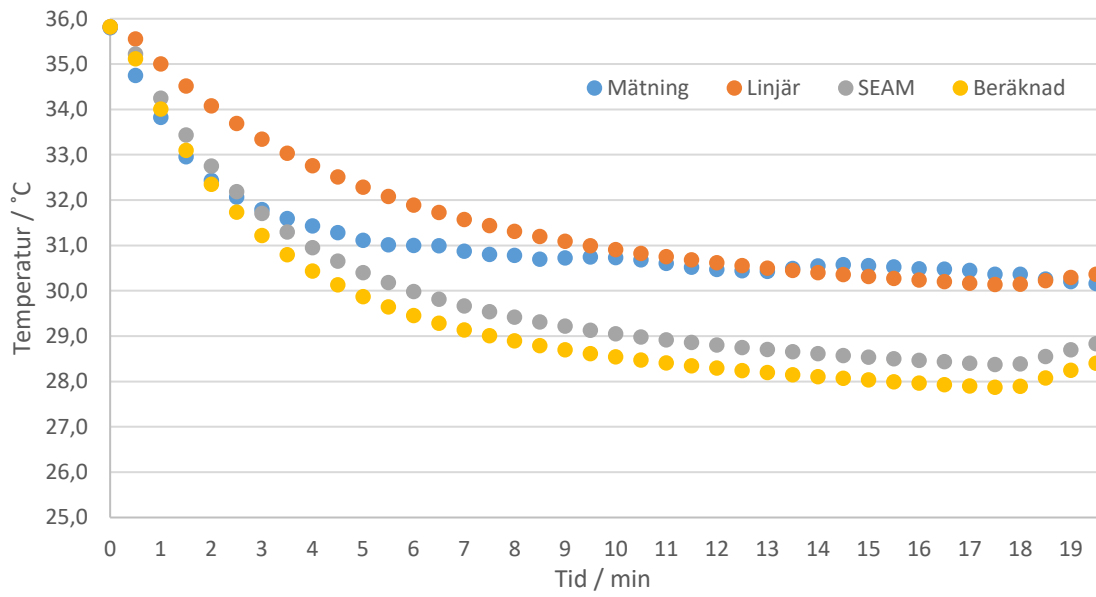
Figur 4.11 visar spårgasmätningens luftflödes variation i tiden för öppningsvinkel 30°.



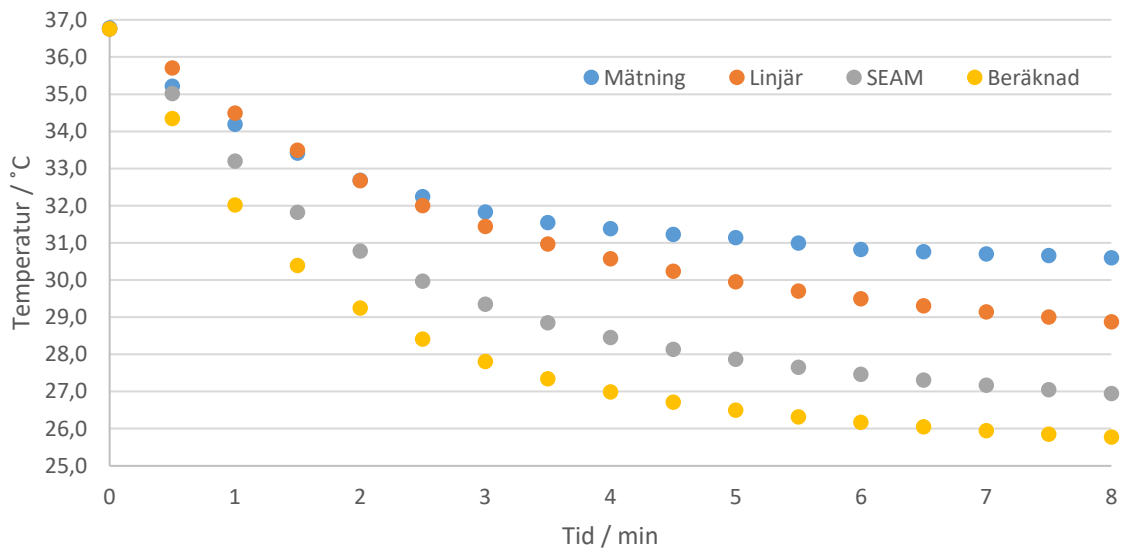
Figur 4.12 visar spårgasmätningens luftflödes variation i tiden för öppningsvinkel 60°.



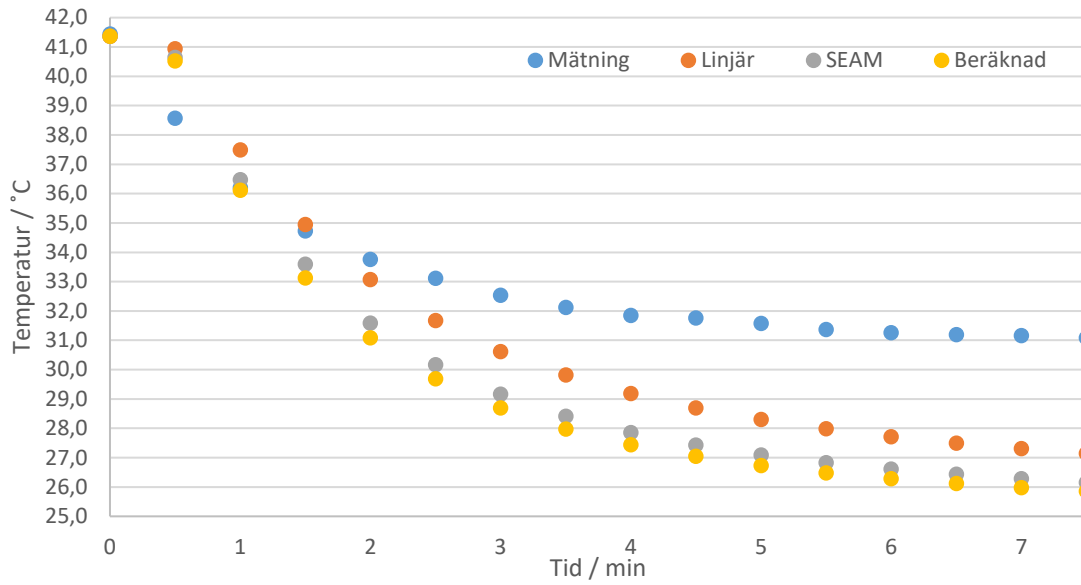
Figur 4.13 visar spårgasmätningens luftflödes variation i tiden för öppningsvinkel 90°.



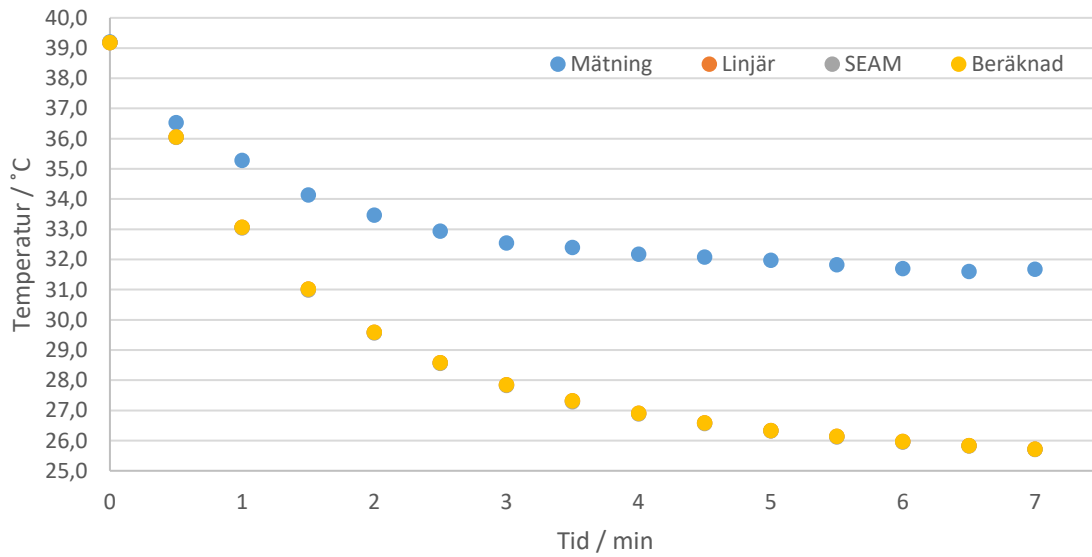
Figur 4.14 visar förändringar i rummets medeltemperatur för öppningsvinkeln 10°.



Figur 4.15 visar förändringar i rummets medeltemperatur för öppningsvinkeln 30°.

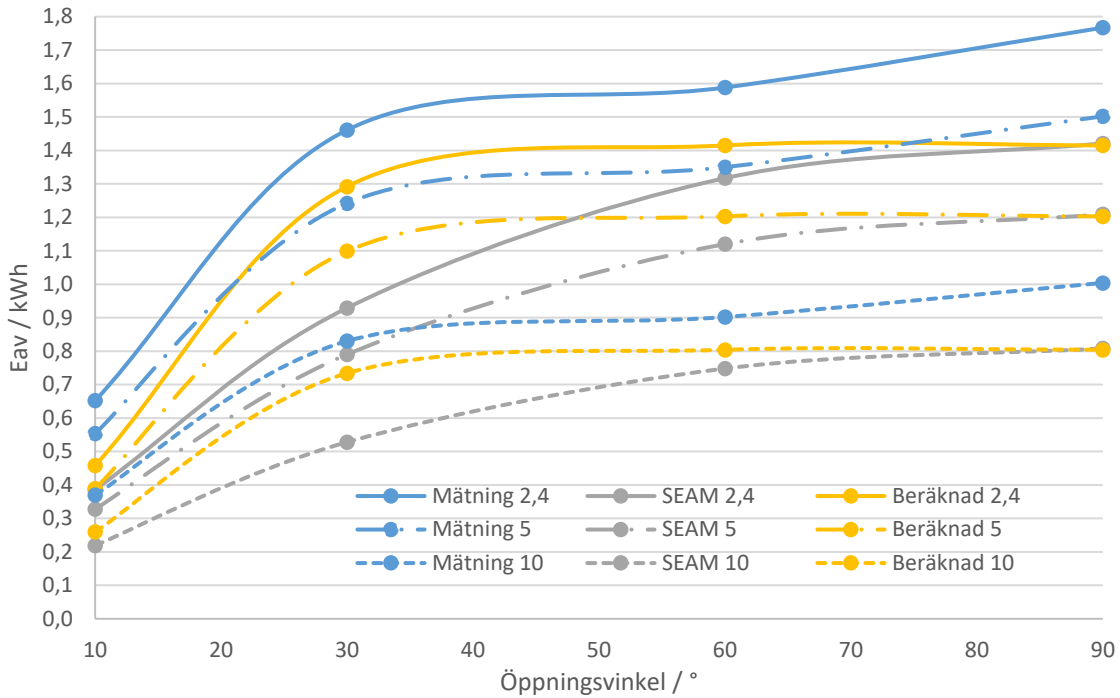


Figur 4.16 visar förändringar i rummets medeltemperatur för öppningsvinkeln 60°.



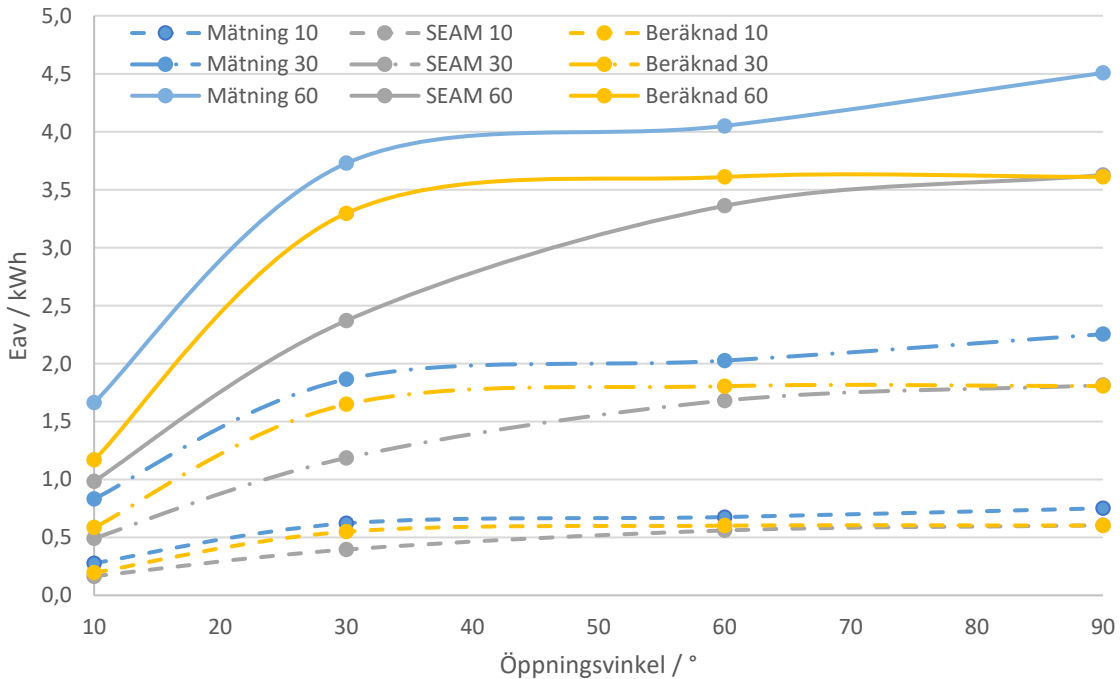
Figur 4.17 visar förändringar i rummets medeltemperatur för öppningsvinkeln 90°.

I Figur 4.18 var vädringslängden konstant 20 minuter, linjetypen skiljer utomhustemperatur i °C samt färgerna källan för medelluftflödet. Figuren visar hur skillnad i medelluftflödet påverkar energibehovet för uppvärmning av den utbytta mängden luft.



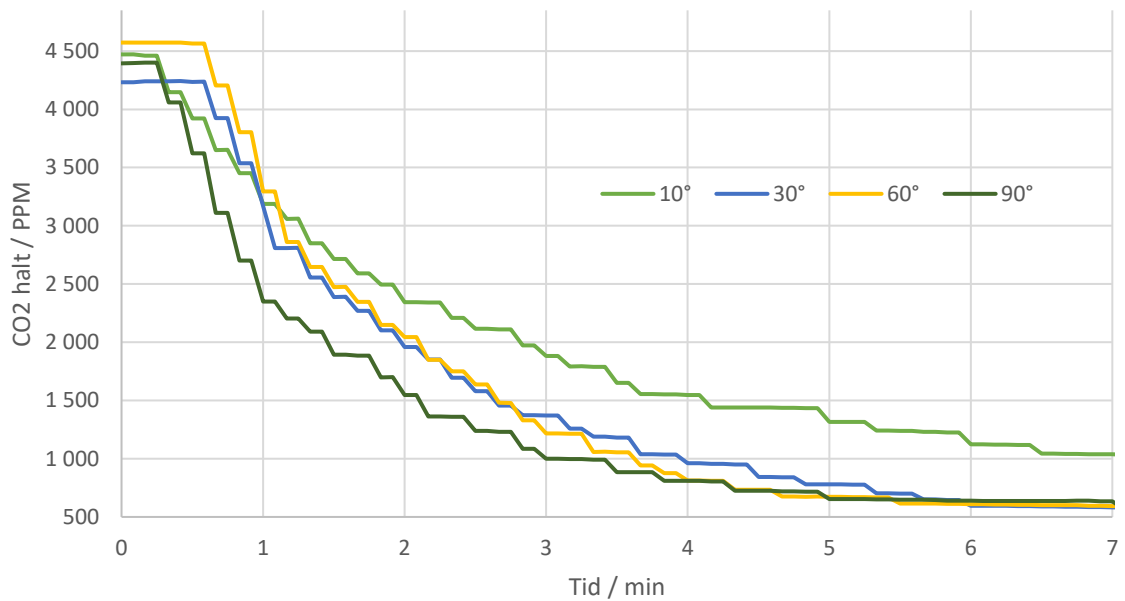
Figur 4.18 visar uppvärmningsenergi-inverkan för vädring med konstant vädringslängd 20 min för tre olika utomhustemperaturer. Linjetypen skiljer utomhustemperatur i °C samt skiljer färgerna källan för medelluftflödet.

I Figur 4.19 var temperaturskillnaden konstant med utomhustemperaturen 5°C, linjetypen skiljer där vädringstiden i minuter.

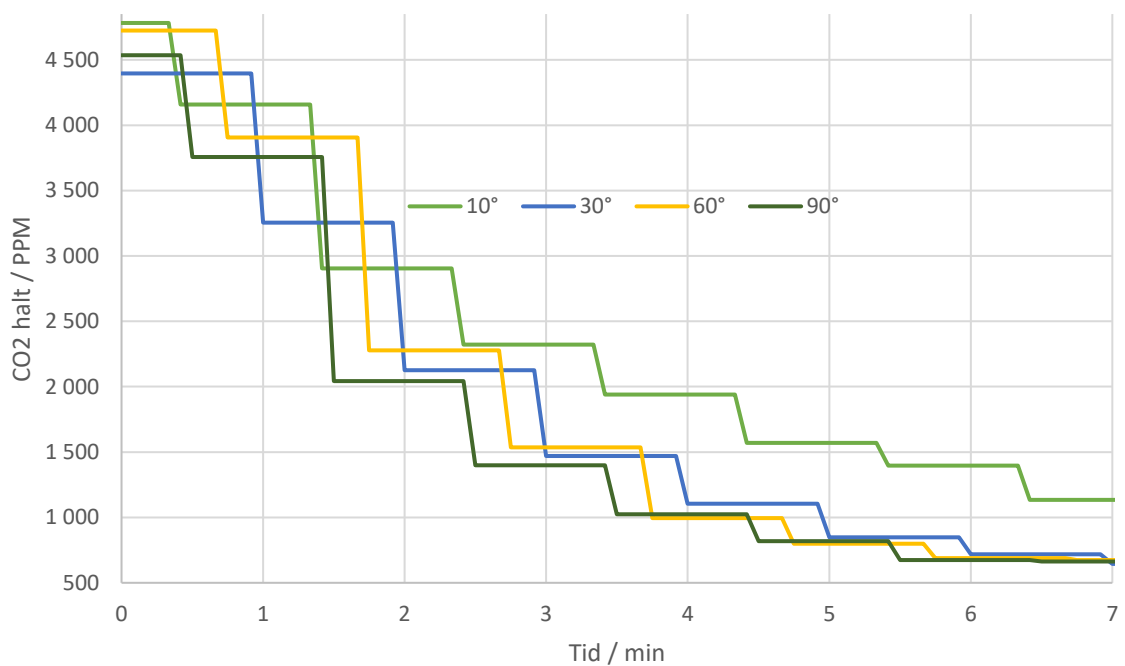


Figur 4.19 visar uppvärmningsenergi-inverkan för vädring med konstant temperaturskillnad och utomhustemperatur 5 °C, för tre olika vädringslängder. Linjetypen skiljer mätlängden i minuter samt färgerna skiljer källan för medelluftflödet

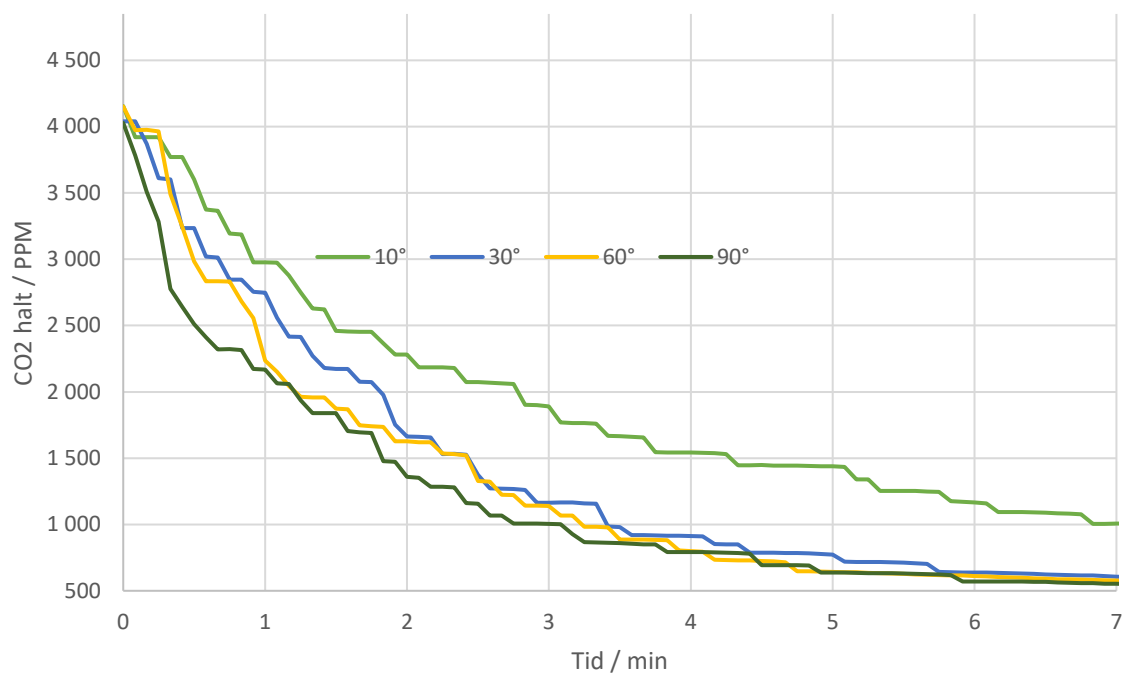
Då Figur 4.2 – Figur 4.5 representerade medelvärden för sju CO₂ sensorer bildades i Figur 4.20 – Figur 4.26 grafer för varje enskild sensor.



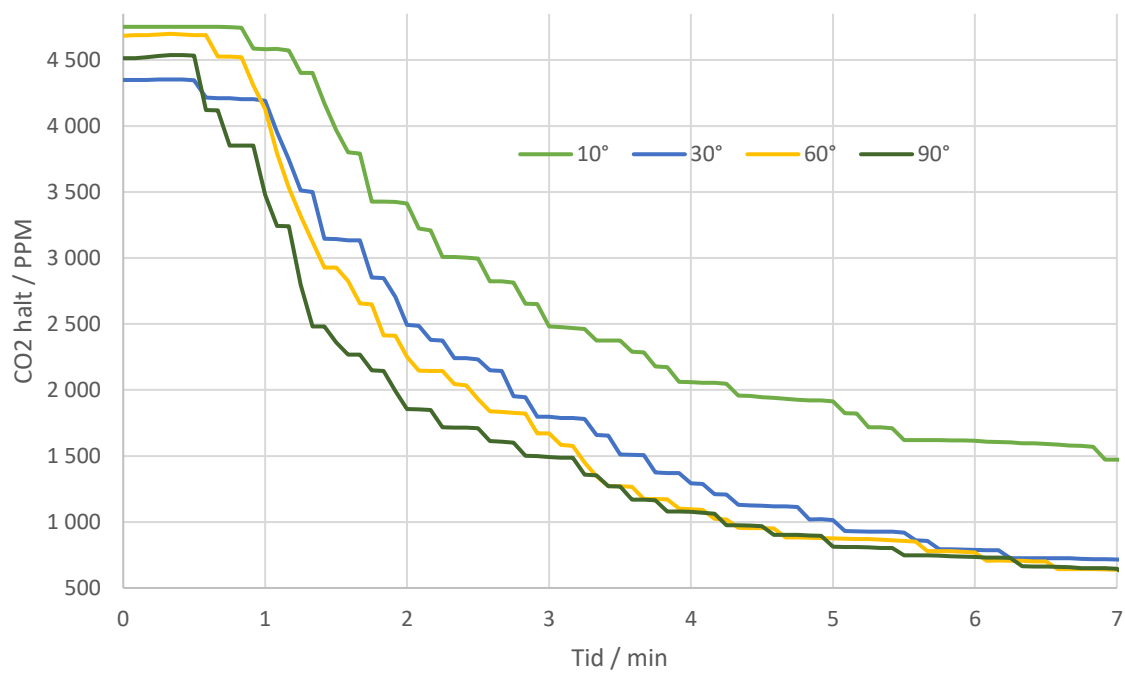
Figur 4.20 visar det uppmätta CO₂ avtagandet vid mättilfället för alla öppningsvinklar loggat av sensor 1.



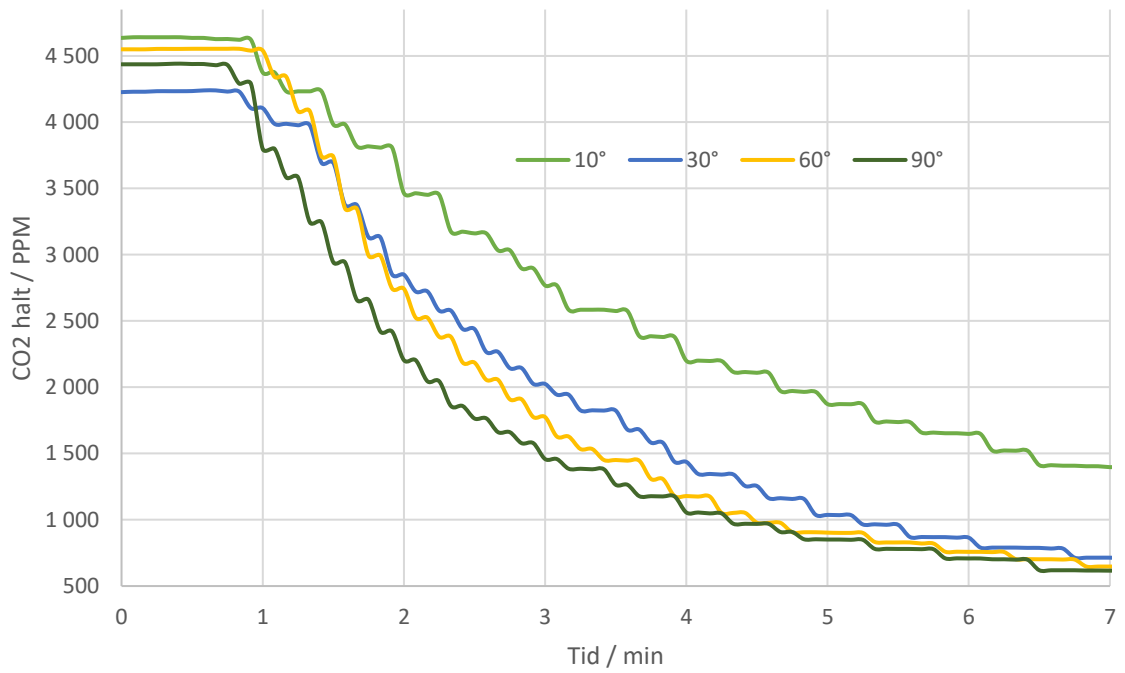
Figur 4.21 visar det uppmätta CO₂ avtagandet vid mättilfället för alla öppningsvinklar loggat av sensor 2.



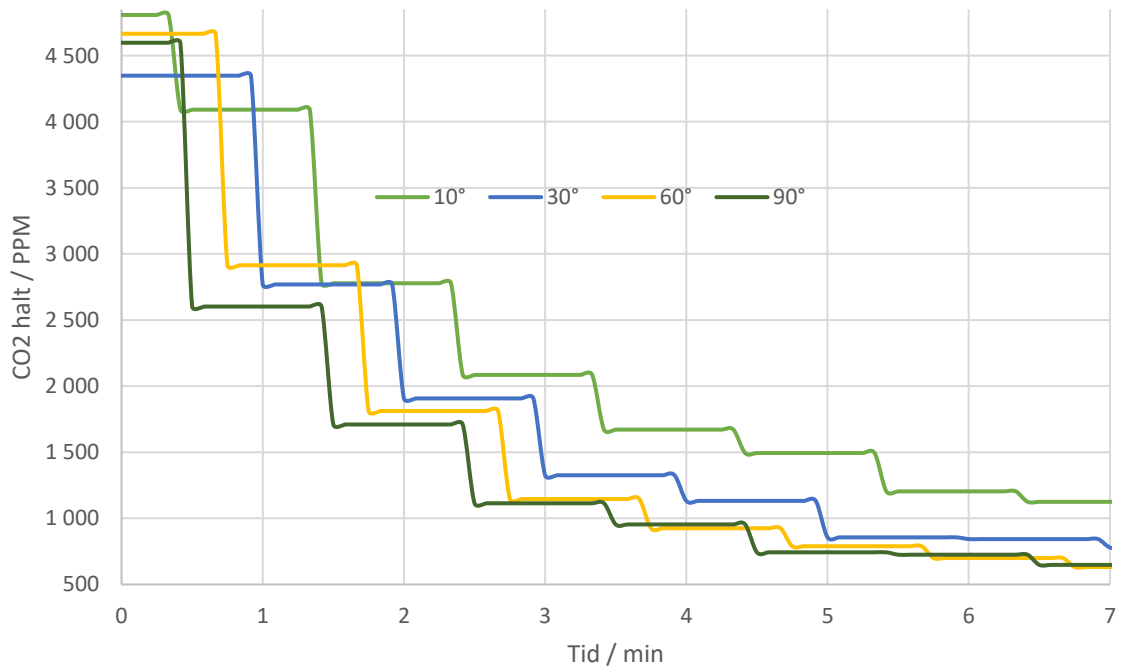
Figur 4.22 visar det uppmätta CO_2 avtagandet vid mättillfället för alla öppningsvinklar loggat av sensor 3.



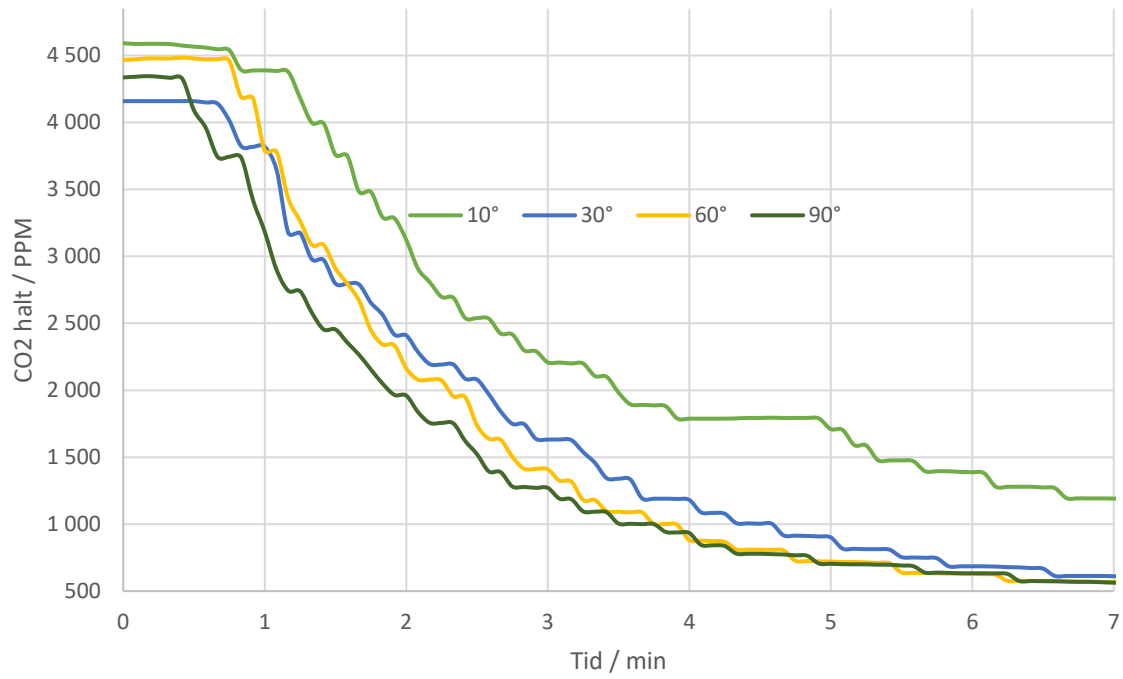
Figur 4.23 visar det uppmätta CO_2 avtagandet vid mättillfället för alla öppningsvinklar loggat av sensor 4.



Figur 4.24 visar det uppmätta CO_2 avtagandet vid mättillfället för alla öppningsvinklar loggat av sensor 5.



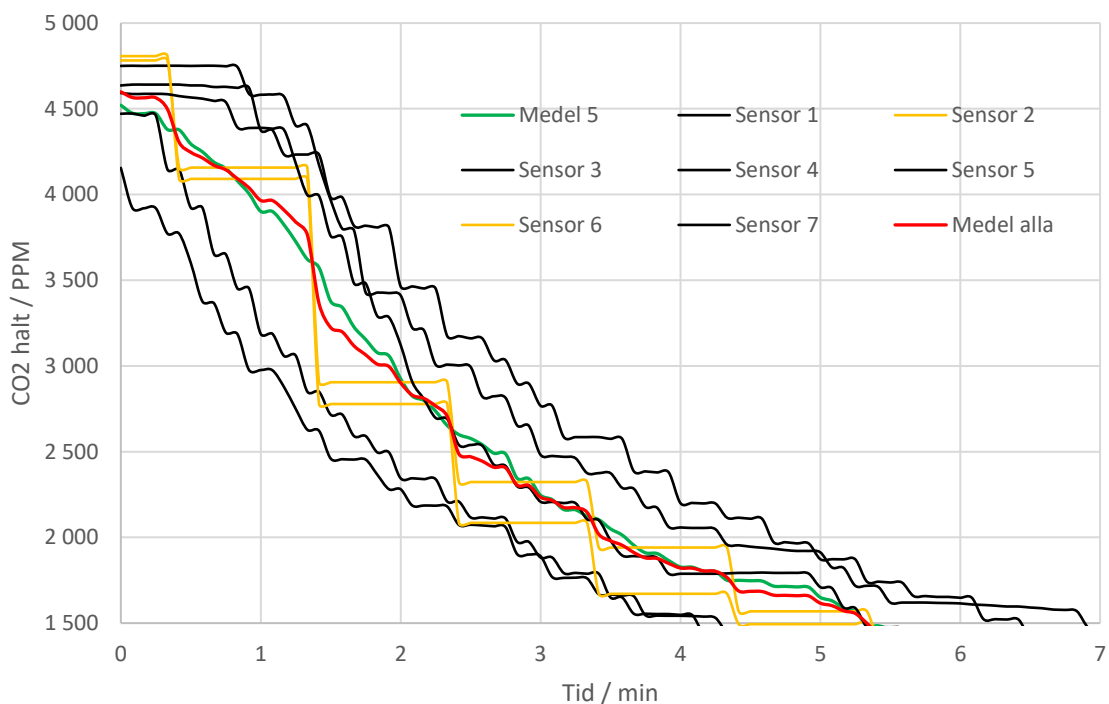
Figur 4.25 visar det uppmätta CO_2 avtagandet vid mättillfället för alla öppningsvinklar loggat av sensor 6.



Figur 4.26 visar det uppmätta CO_2 avtagandet vid mättilfället för alla öppningsvinklar loggat av sensor 7.

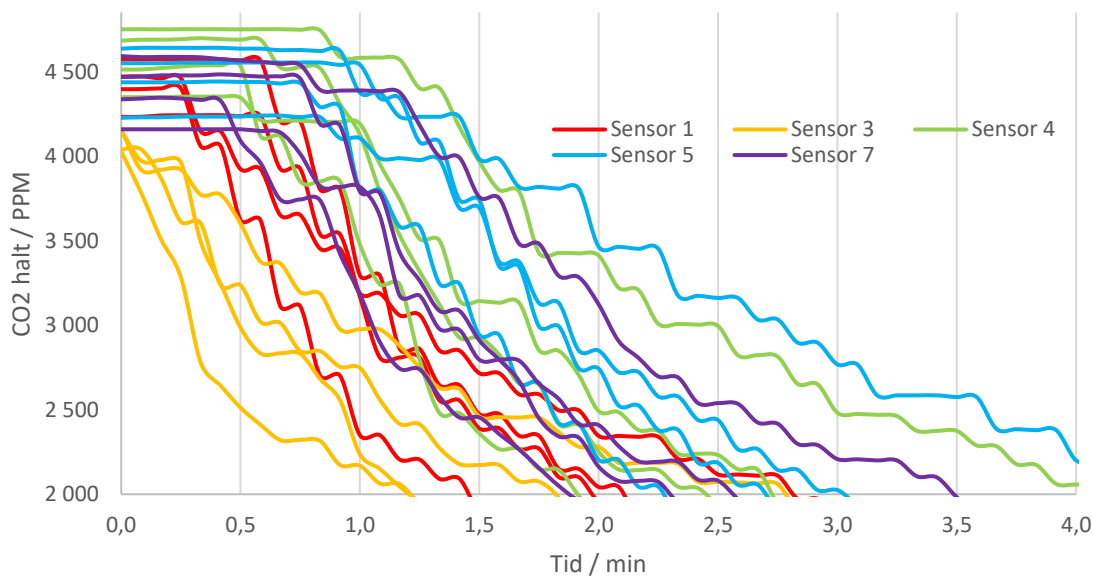
5 Diskussion

Sensor 2 i Figur 4.21 samt sensor 6 i Figur 4.25 avvek med 1 minuts tidssteg. Sensorernas inverkan i rummets medelvärdesbildning analyserades för öppningsvinkeln 10° i Figur 5.1. Där Medel alla (röd) baserades på alla sensorer, både 5 sekunders tidssteg (svarta) samt 1 minuters (gula). Medel 5st (grön) baserades endast på 5 sekunders tidssteg (svarta). Inverkan av sensorerna 2 och 6 representerades av hur röda grafen avvek från gröna grafen. Avvikelsen i Figur 5.1 antyder att graferna för mätningarna i Figur 4.1 - Figur 4.5 skulle kunna uppvisat ett jämnare avtagande med korrekt tidssteg för sensor 2 och sensor 6.



Figur 5.1 visar inverkan av felaktigt tidssteg i rummets medelvärdesbildning för CO_2 sensorerna. Röd graf användes vid simulering, grön referensgraf är exkluderad av sensor 2 och sensor 6 som båda har tidssteg 1 min.

I Figur 4.2 - Figur 4.5 återfanns en fördröjning för mätningarna vid start, tydligast i Figur 4.3 - Figur 4.5. Fördröjningen sammanställdes i Figur 5.2 där sensor 3 uppvisade minsta fördröjningen. Enligt Figur 3.5 var sensorerna 3 och 5 horisontellt placerade 0,95 m innanför fönstret. Vertikalt visade Figur 3.6 sensor 3 till en höjd på 0,95 m, samt sensor 5 på 1,9 m. Sensor 5 hade jämfört med sensor 3 längre fördröjning, vilket även syns i jämförelse av Figur 4.24 - Figur 4.22. Detta antydde att det för mätningarna fanns en tidsmässig fördröjning för hur CO₂ avtog i rummet under vädringen. I motsats spåds i modellen CO₂ ut jämnt i hela luftvolymen. I modellen finns inte möjligheten att dela upp luftvolymen, därav kan inte heller CO₂ halten mätas på olika ställen inom rumsvolymen. Skillnader kan då bero på att detta gjordes vid mättillfället, samt inte är möjligt för modellen.



Figur 5.2 visar sensorerna med tidssteg 5 sekunder för alla öppningsvinklarna. Figuren visualiserade samband mellan fördröjning i start och sensorplacering.

I syfte att bedöma prestationen av simuleringarna bildades Tabell 5.1 vilken uttryckte den uppnådda relativa andelen av mätningens medelluftflöde. Det poängterades återigen att Linjär och Beräknad till skillnad från SEAM överskattats för 10°, 30°, 60°. Utifrån antagandet om C_d faktor blev således 90° mest korrekt, skillnader mellan mätning och simuleringar antydde där att det kunde finnas generella osäkerheter i jämförelserna. Viktigt var att nämna att mätningarna tagit hänsyn till interfacial mixing vilket inte gjorts i någon av simuleringarna. Detta bidrog för simuleringarna ytterligare till överskattning.

Tabell 5.1 visar för simuleringarna den procentuella andel av mätningens medelluftflöde som uppnåts.

Öppningsvinkel	10°	30°	60°	90°
Linjär	25,3 %	35,9 %	65,4 %	80,1 %
SEAM	59,1 %	63,6 %	83,0 %	80,5 %
Beräknad	70,2 %	88,4 %	89,1 %	80,1 %

Det fanns inom samma öppningsvinkel mellan simuleringarna stora variationer i resultat, vilket minskade med ökad öppningsvinkel. I Tabell 4.1 analyserades detta för varje enskild öppningsvinkel. Största avvikelse ifrån simuleringarnas gemensamma medelvärde uttryckte då osäkerheten, vilket presenteras i Tabell 5.3. Där osäkerheten kopplas till just valet av beräkningsmodell.

Tabell 5.2 redovisar hur skillnaderna mellan simuleringarnas resultat förändras med öppningsvinkel. Medelvärde simuleringar beräknades ur tabell 4.1. Skillnaden mellan medelvärdet och resultatet med störst avvikelse visas som största avvikelse från medel. Resultatens osäkerhet visas med största avvikelse relativt medelvärdet.

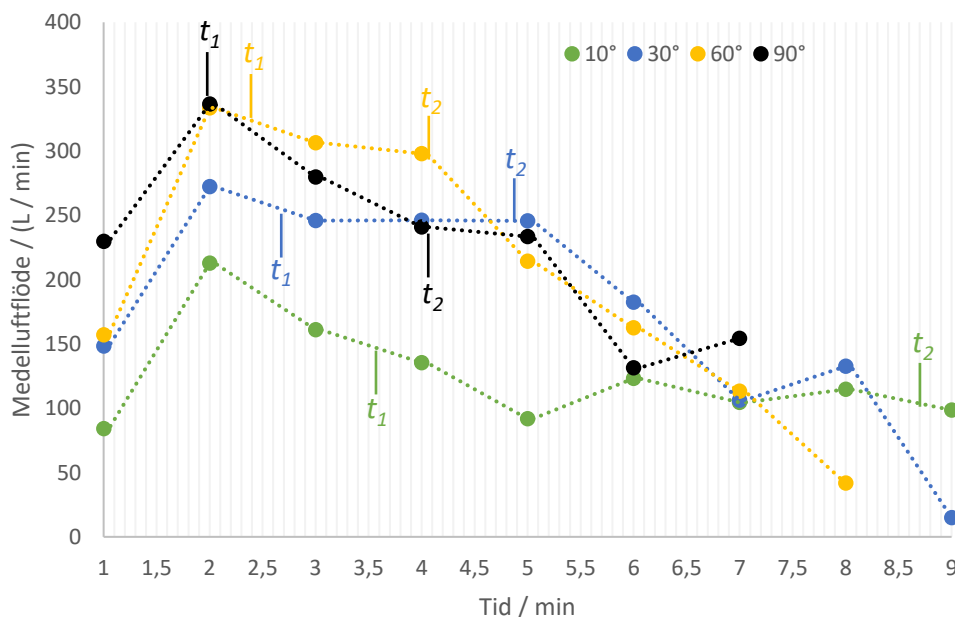
Öppningsvinkel	10°	30°	60°	90°
	$q / (l/s)$	$q / (l/s)$	$q / (l/s)$	$q / (l/s)$
Medelvärde simuleringar	43,6	118,8	163,1	184,0
Störst avvikelse från medel	22,2	50,7	28,4	0,5
Max avvikelse relativt medel	51,0 %	42,7 %	17,4 %	0,3 %

Nordquist (1998) beskrev med en förenklad dynamisk modell att luftutbytet i ett rum existerade mellan de två ytterligheterna, ingen eller total omblandning av rumsluften. Utan omblandning var inkommande kallluftsvolym helt polariserad från rummets varmluftsvolym med en abstrakt skiljelinje. Påfyllnad av inkommande kallluft skulle succesivt höja skiljelinjen och trycka ut varmluften ovan. Luftflödet avtog då skiljelinjen nått fönstrets underkant, samt avstannade vid fönstrets ovankant. Detta innebar samtidigt att varmluft i volymen ovan fönstret inte vädrades. Total omblandning beskrevs med konstant skiljelinjehöjd, i stället avtog luftflödet med den sjunkande inneluftstemperaturen. För total omblandning späds kalla uteluften ut jämnt i hela luftvolymen. Därför sker också temperaturförändringen i hela luftvolymen, även i luften ovan fönstret.

Likheter mellan mätningarna med beskrivningen ingen omblandning analyserades. Skiljelinjens placering i höjden tolkades från utbytt luftvolym i tiden. Placeringen motsvarade fönstrets under respektive ovankant vid luftutbytesmängderna $V_1 = 33,5 \text{ m}^3$ respektive $V_2 = 67,2 \text{ m}^3$. Tider uppskattades ifrån sammanställda tabellerna och redovisas i Tabell 5.3 samt insatt i respektive flödesgraf i Figur 5.3.

Tabell 5.3 visar för mätningarna hämtade tider för motsvarande utbytt luftvolym med indelning i rumshöjden. Tiden t_1 för luftvolym V_1 under fönstret. Tiden t_2 för luftvolym V_2 framför fönstret.

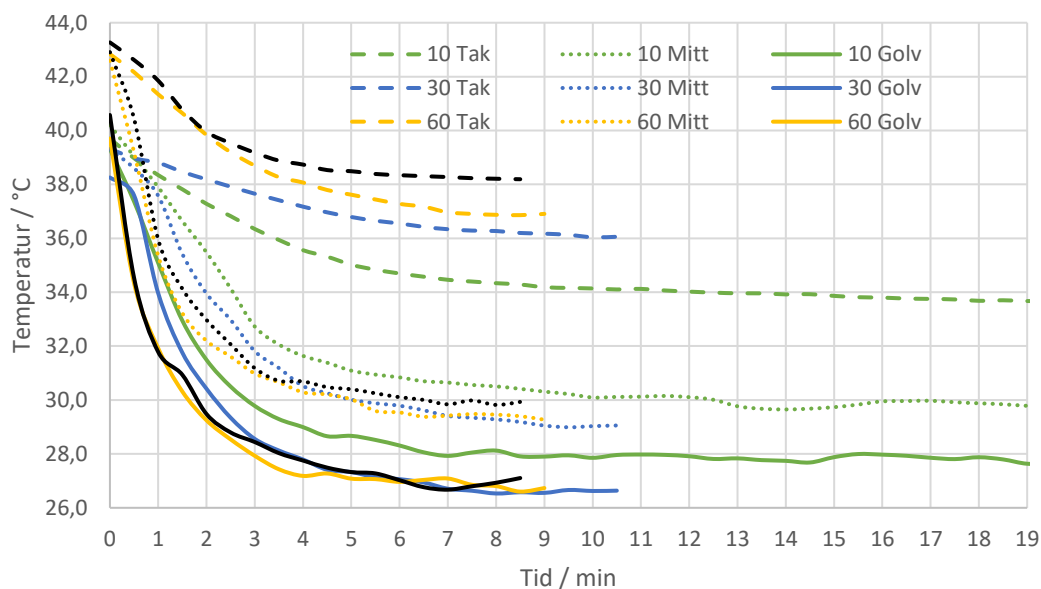
Öppningsvinkel	10°	30°	60°	90°
t_1 / mm: ss	03:40	02:40	02:20	02:00
t_2 / mm: ss	08:45	04:55	04:05	04:05



Figur 5.3 visar mätningarnas flödesfördelning med tider för luftskiljelinjens placering vid fönstrets underkant med t_1 samt fönstrets ovankant med t_2 .

För öppningsvinklarna 30°, 60°, 90° i Figur 5.3 uppfattades tendenser finnas till tidsmässigt samband mellan flödesförändringen beskriven av förloppet för ingen omblandning. Det var dock svårt att tolka hur medelvärdesbildningen inverkat i tidsförskjutningen av flödesgraferna. Enligt ingen omblandning skulle luftvolymen över fönstret inte vädras, vilket skulle innebära att en tredjedel av rumsvolymen behållit högre lufttemperatur.

I omblandningsytterligheterna beskrevs olika temperaturvariationer. Fortsatt undersöktes därav temperaturförändringarna under förloppen för mätningarna och simuleringarna. För mätningarnas likhet till ingen omblandning var skillnader i höjdmässiga volymskikten intressant. Speciellt förändringarna i översta skiktet som fick representera volymen över fönstret. Temperaturen för mätningarna i Figur 4.14 - Figur 4.17 stagnerade mot 31 °C ± 1 °C. Figur 5.4 skapades och visade variation i de olika volymskiktens medeltemperaturer.



Figur 5.4 visar medeltemperaturen för rummets tre olika höjdmässiga skiktindelningar enligt figur 3.9 – figur 3.11.

Temperaturen i volymen över fönstret var inte konstant, dock fanns en tydlig temperaturskillnad mellan volymskikten. Detta följde mätningarnas liknelse vid ingen omblandning. Samtidigt kunde simuleringarnas temperaturfördelning i Figur 4.14 - Figur 4.17 med avtagande under hela förloppet liknas mer vid beskrivning av total omblandning. Vilket möjligen kan förklara den liknande flödesfördelningen i Figur 4.10 – Figur 4.13.

En teori är att flödesskillnader mellan simulering och mätning bland annat kan bero av innetemperaturens förändringar. Där mätningarna erhåller högre medelluftflöde samt högre sluttemperatur. Där sambandet mellan bevarad drivkraft på grund av bevarad inomhustemperatur skulle förklara det högre flödet.

Enkla riktvärden syntes i Figur 4.18 för vädring i 20 minuter med medelflödet från mätningen vid 90° öppningsvinkel. För utomhustemperaturerna 10 °C respektive 5 °C avläses 1 kWh respektive 1,5 kWh. Avläsning av skillnad mellan mätning och simuleringarna för graferna 5 °C i Figur 4.18 ger 0,3 kWh för 20 minuters vädring vid 90° öppningsvinkel.

Det finns många osäkerheter i arbetet som inte diskuterats tidigare. Bland annat kan användandet av klimatdata från klimatstationen inverkat generellt i samtliga av simuleringarna. Även inverkan av CO₂ givarnas spridning ifrån kalibreringen vilken presenteras i Tabell 3.2, där idealiskt alla givare skulle haft samma medelvärde. Osäkerheter finns vid jämförelse av spårgasmätningen med CO₂ halt i rummet från simuleringen. I mätning med totalomblandning vid start och där ojämnblandning råder vid slutvärdet, skulle detta kunna misstas för extra flöde. Med sensorplaceringen enligt dessa mätningar är det svårt att avgöra om ojämnblandning ens kunnat uppstå. Möjligt hade en del av Nordquist (1998) metod varit tillämpbar för kontroll av omblandning. I syfte att säkerställa totalt omblandad spårgaskoncentration vid start och avslut av vädring utförde Nordquist (1998) avklingningsmätningar samtidigt som fläktar omblandade. Detta gjordes efter spårgas tillförts, under 10 min före vädringens start samt under 10 min efter vädringens avslut. Med linjär regression av uppmätt spårgaskoncentration för mätning före respektive efter vädringen, erhöles ekvationer för spårgaskoncentrationerna i tiden. Ekvationerna möjliggjorde extrapolering av fullständigt omblandad spårgaskoncentration. Denna extrapolering hade för mätningen efter vädring kunnat göras bakåt i tiden och ge totalt omblandad koncentration vid vädringens avslut.

6 Slutsatser

Syftet var att ge bättre underlag för energiberäkningar genom simulering. Huvudmålet var att visa om simuleringar är ett bra sätt att beskriva luftflödet vid olika öppningsgrader för ett sidohängt fönster.

Slutsatsen som kan dras är att om simuleringsmodellen används för att utföra energiberäkningar av vädring med sidohängt fönster, så har resultaten med förutsättningarna i detta arbete visat att det leder till att luftflödet underskattas. Det var svårt att avgöra hur skjutfönstermodellen skulle hanterat öppningsvinklar. En entydig hantering hade för programmet därmed kunnat minska felet.

1. Vilka skillnader går att visa mellan simulering och mätning i vädringsförloppet?

Det har i arbetet visats att det finns variationer ifrån mätningarnas vädringsförlopp som inte återspeglas i simuleringarna. Dels i hur CO₂ halten avtar, även om detta till viss del kan bero på ett felaktigt tidssteg. Dels utgör fördröjning i start och avtagande i slutet skillnader i luftflödesfördelningen. Även skillnad i sluttemperatur och temperaturfördelning har uppmärksamats. Dessa skillnader skulle kunna bero på hur omblandning simuleras. Detta är dock inte fastställt.

2. Hur påverkar fönsteröppningens areabeskrivning luftflödet?

Generellt underskattades luftflödet för simuleringarna jämfört med mätningarna för samtliga öppningsvinklar. Simuleringarna har samtidigt då inte tagit hänsyn till förluster benämnt Interfacial mixing. Förutsättningarna för simuleringarna stämde bäst överens med mätningarna för öppningsvinkel 90°. Medelluftflödet visade att Linjär, SEAM och Beräknad jämfört med Mätning då underskattade luftflödet med 20 %. Resultatet för övriga öppningsvinklar visade att Linjär var olämplig att använda för annat än 90°. Luftflödet för Beräknad överskattades samtidigt, denna överskattning ökade då med minskad öppningsvinkel. Öppningsvinkel 60° visade underskattning av luftflödet för SEAM och Beräknad till 17 % respektive 11 %. För vinkeln 30° visades motsvarande underskattning till 36 % respektive 12 % samt slutligen för vinkeln 10° till underskattningarna 41 % respektive 30 %.

3. Hur stor energiinverkan motsvarar skillnader i medelluftflödet?

Med från arbetet resulterande luftflöden samt med förenklad modell beräknades konsekvensen av luftutbytets kylning. Detta visade energiinverkan i ett tänkt uppvärmningssystem. För fallet 90° öppningsvinkel och 5 °C utomhustemperatur visades en skillnad mellan mätningen och simuleringarna om 0,3 kWh för 20 minuters vädring.

7 Ev. framtida forskning

I min litteraturstudie fanns inte mycket arbete kring interfacial mixing, detta har därav behövt avgränsas. Hur stor inverkan detta har i flödet för ensidig vädring borde undersökas ytterligare. Med den typen av information hade osäkerheter i jämförelsen mellan mätning och simulering i detta arbete kunnat minskas.

Referenser

- ABDUL HAMID & IBRAHIMOVIC. 2013. *Energiförluster på grund av vädring i nybyggda flerbostadshus: En del i energiuppföljningen av Flagghusen i Malmö*. Masteruppsats, L.
- AKADEMISKA-HUS. u.å. *EBD-lab på Lunds Tekniska Högskola, LTH* [Online]. Available: <https://www.akademiskahus.se/vara-kunskapsmiljoer/byggprojekt/vara-byggprojekt/lund/ebd-lab-pa-lunds-tekniska-hogskola-lth/> [Accessed].
- BENJAMIN M. JONES, M. J. C., SHAUN D. FITZGERALD, CHRISTOPHER R. IDDON 2016. A REVIEW OF VENTILATION OPENING AREA TERMINOLOGY. *Energy and Buildings*, 118, 249-258.
- BERGVALL & CERPS. 2020. *Vädringsvanor och energiberäkningar: En enkätstudie kring vädringsvanor och dess påverkan på energiberäkningar i bostäder*. Examensarbete.
- BOVERKET 2017. Boverkets föreskrifter och allmänna råd om fastställande av byggnadens energianvändning vid normalt brukande och ett normalår BFS 2017:6 BEN 2.
- BOVERKET 2020. Boverkets byggregler (2011:6) – föreskrifter och allmänna råd, BBR. *BFS 2011:6 med ändringar till och med BFS 2020:4*.
- BOVERKET. 2022. *Primärenergital och byggnadens energiprestanda* [Online]. Available: <https://www.boverket.se/sv/byggande/bygg-och-renovera-energieffektivt/energi-hushallningskrav/primarenergital-och-byggnadens-energi-prestanda/> [Accessed].
- CAIQING YANG, H. S., HUI SHI, BIN ZHAO 2010. Research on Flow Resistance Characteristics with Different Window/Door Opening Angles. *HVAC and R Research*, 16, 813-824.
- ENERGIMYNDIGHETEN. 2022. *Energiläget* [Online]. Available: <https://www.energimyndigheten.se/statistik/energilaget/> [Accessed].
- FORSBERG & LIND. 2021. *Spara och Slösa: En studie i hur brukare påverkar energianvändningen i plusenergihus*. Lunds Universitet.
- HANSSON & NORDQUIST 2010. Uppföljning Flagghusen : energi och inneklimat - Slutrapport.
- HILDEBRANDO CRUZ, J. C. V. 2016. On-site assessment of the discharge coefficient of open windows. *Energy and Buildings*, Volume 126, 463-476.
- L. FERNANDES, M. F., D. CÓSTOLA, E. MATSUMOTO, L. LABAKI, F. WELLERSHOFF 2020. Evaluation of discharge coefficients of large openable windows using full-scale samples in wind tunnel tests. *Revista Ingenieria de Construccion* 35 203-214.
- MUSINGUZI, S. u.å. Laboratory Measurements Regarding Air Change Rate for Airing. Lund University.

- NORDQUIST, B. 1998. *Vädring i skolor - ett komplement till normal ventilation?*, Lund, KFSAB.
- PATRICK SHARPE, B. J., ROBIN WILSON, CHRISTOPHER IDDON 2020. What we think we know about the aerodynamic performance of windows. *Energy and Buildings*, 231.
- PER HEISELBERG, K. S., PETER V. NIELSEN 2001. Characteristics of airflow from open windows. *Building and Environment* 36, 36, 859–869.
- PER LEVIN, P. C. 2017. *Så korrigeras husets energianvändning enligt BEN* [Online]. Energi & Miljö: EMTF Förlag AB. Available: <https://www.energi-miljo.se/sa-korrigeras-husets-energianvandning-enligt-ben/> [Accessed 40 nr 3-4].
- REGERINGSKANSLIET 2022. Direktivet om byggnaders energiprestanda *In: INFRASTRUKTURDEPARTEMENTET* (ed.). Sveriges Riksdag.
- RÅDET. 2023. *55 %-paketet* [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/sv/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> [Accessed].
- SANDBERG, P. H. M. 2006. Evaluation of Discharge Coefficients for Window Openings in Wind Driven Natural Ventilation. *International Journal of Ventilation*, 5, 43-52.
- SANDIN, K. 2010. *Praktisk Byggnadsfysik*, Lund, Studentlitteratur AB.
- SMHI. u.å. *Års- och månadsstatistik* [Online]. Available: <https://www.smhi.se/klimat/klimatet-da-och-nu/manadens-vader-och-vatten-sverige/manadens-vader-i-sverige/ars-och-manadsstatistik> [Accessed 2023-05-04 2023].
- SVEBY 2012. Brukarindata bostäder