

Luftvärme i lågenergihus

En studie av inomhusklimat i flerbostadshus

Robin Karlsson

Tomas Larsson

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet, 2012
Rapport TVIT--12/5034



Lunds Universitet

Lunds Universitet, med nio fakulteter samt ett antal forskningscentra och specialhögskolor, är Skandinaviens största enhet för forskning och högre utbildning. Huvuddelen av universitetet ligger i Lund, som har 100 400 invånare. En del forsknings- och utbildningsinstitutioner är dock belägna i Malmö, Helsingborg och Ljungbyhed. Lunds Universitet grundades 1666 och har idag totalt 6 000 anställda och 41 000 studerande som deltar i ett 90-tal utbildningsprogram och ca 1000 fristående kurser erbjudna av 88 institutioner.

Avdelningen för installationsteknik

Avdelningen för Installationsteknik tillhör institutionen för Bygg- och miljöteknologi på Lunds Tekniska Högskola, som utgör den tekniska fakulteten vid Lunds Universitet. Installationsteknik omfattar installationernas funktion vid påverkan av människor, verksamhet, byggnad och klimat. Forskningen har en systemanalytisk och metodutvecklande inriktning med syfte att utforma energieffektiva och funktionssäkra installationssystem och byggnader som ger bra inneklimat.

Nuvarande forskning innefattar bl a utveckling av metoder för utveckling av beräkningsmetoder för godtyckliga flödessystem, konvertering av direktelvärmda hus till alternativa värmesystem, vädring och ventilation i skolor, system för brandsäkerhet, alternativa sätt att förhindra rök-spridning vid brand, installationernas belastning på yttre miljön, att betrakta byggnad och installationer som ett byggnadstekniskt system, analysera och beräkna inneklimatet i olika typer av byggnader, effekter av brukarnas beteende för energianvändning, reglering av golvvärmesystem, bestämning av luftflöden i byggnader med hjälp av spårgasmetod. Vi utvecklar även användbara projekteringsverktyg för energi och inomhusklimat, system för individuell energimätning i flerbostadshus samt olika analysverktyg för optimering av ventilationsanläggningar hos industrin.

Luftvärme i lågenergihus

En studie av inomhusklimat i flerbostadshus

Robin Karlsson

Tomas Larsson

© *Robin Karlsson och Tomas Larsson*
ISRN LUTVDG/TVIT--12/5034--SE(117)

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
22100 LUND

Förord

Det här examensarbetet har utförts som ett samarbete mellan Avdelningen för Installationsteknik på LTH, Byggfysikgruppen på Skanska Teknik i Malmö och Utvecklingsavdelningen på Swegon AB i Tomelilla.

Först och främst vill vi tacka Dennis Johansson, vår handledare på Avdelningen för Installationsteknik, LTH. Du har alltid tagit dig tid att besvara våra frågor och även gett oss nya frågor att klura på. Tack även till Birgitta Nordquist, vår examinator, för din positiva inställning och engagemang.

Vidare vill vi tacka Stefan Ferrari och Byggfysikgruppen på Skanska Teknik för ett gott välkomnande och möjligheten att sitta hos er under arbetet. Ett stort tack vill vi även rikta till Andreas Wackenfors, Viveka Anderberg och alla andra hjälpsamma medarbetare på R&D på Swegon AB i Tomelilla som gjorde våra två veckor på Österlen angenäma.

Lund, Juni 2012

Tomas Larsson

Robin Karlsson

Sammanfattning

Ventilationssystemet i en byggnad kan användas som värmesystem genom att värma tilluften, en lösning som har använts sedan 1800-talets början (Bruegmann, 1978). På 1980-talet byggdes en del småhus med luftvärme. Detta gav bättre kontroll över ventilationsflödena men det visade sig ibland vara svårt att få ut värmen i husets alla delar. Om inte värmen når ut i husets alla delar kan det även innebära att inte heller ventilationsluften gör det, vilket i sin tur leder till dålig luftkvalitet.

En förklaring till problematiken med värmespridning kan vara att 1980-talets småhus hade för stora effektbehov för att kunna värmas med luft utan försämrat inomhusklimat. Hus som har betydligt lägre effektbehov är de hus som idag byggs som lågenergihus, i dessa tros därför luftburen värme kunna fungera bättre. Flera utvärderingar har gjorts på sådana hus men det saknas ingående undersökningar som utreder det kombinerade värme- och ventilationssystemets möjligheter att skapa ett bra inomhusklimat med avseende på mätbara storheter.

I detta examensarbete undersöks termiskt klimat och luftkvalitet i en lägenhet i ett flerfamiljs-lågenergihus. Resultaten jämförs med krav och rekommendationer som finns för att sedan bedöma om luftburen värme är en bra lösning ur inomhusklimatperspektiv.

Mätningar utförs i ett fullskalelaboratorium, på ett mätobjekt som utgör en del av en lägenhet. Simuleringar utförs i CFD-programmet FloVENT på motsvarande datormodell. Resultaten från dessa mätningar och simuleringar jämförs för att validera metoden. I nästa steg utförs simuleringar på en större modell som ej är möjlig att mäta i fullskala. Resultaten utgörs av lufttemperaturer, operativa temperaturer, luftfarter, PMV och PPD, samt luftutbyteseffektivitet och lokalt index.

Jämförelsen mellan simuleringar och mätningar för den lilla modellen visar att överensstämmelsen för lufttemperatur är god. Luftfarterna avviker mycket vilket kan förklaras med stor känslighet i placeringen av mätpunkterna. Luftutbyteseffektivitet och lokalt index avviker mycket inom mätning och simulering samt i jämförelsen dem emellan. En stor del av avvikelsen kan förklaras med att ventilationsflödet varierade mycket under mätningarna.

Resultaten för den lilla modellen visar att PPD, andel missnöjda, dvs andelen som ej upplever termisk komfort, är högt, ofta 20-40 procent, samtidigt är PMV negativt vilket visar att det termiska klimatet upplevs som svalt. Detta torde möjligen åtgärdas genom att höja måltemperaturen och därmed uppnå termisk komfort. I samband med detta måste risken för att luftutbyteseffektiviteten kan bli sämre beaktas eftersom ventilationens förmåga att föra bort föroreningar från vistelsezonen då kan påverkas negativt.

Luftutbyteseffektivitet och lokalt index är varierande men uppfyller i flera av fallen rekommendationen 90 procent. Resultaten från mätningarna översteg ofta det förväntade

Luftvärme i lågenergihus

värdet med stor marginal, ibland erhöles t o m helt orimliga värden och två simuleringar gav inga resultat alls. Det finns alltså en stor osäkerhet kring dessa storheter. Möjliga osäkerheter och felkällor har identifierats under arbetets gång vilka bör utredas för att kunna dra säkra övergripande slutsatser.

Resultaten för den stora modellen visar på bra termiskt inomhusklimat, förutom i enstaka punkter. PPD överstiger sällan 15 procent. Anledningen till att PPD är så pass mycket lägre än för lilla modellen är att den tillförda effekten är högre. I denna modell varierar luftutbyteseffektivitet och lokalt index mindre, men är genomgående höga.

Resultaten visar att i några av de studerade fallen uppnås termisk komfort och tillfredsställande luftkvalitet i form av luftutbyteseffektivitet och i några av de studerade fallen uppnås inte termisk komfort och bra luftkvalitet, bl a ger en öppen dörr mellan sovrum och kök negativa konsekvenser på ventilationens förmåga att föra bort föroreningar.

Dock medger ej resultaten att några generella slutsatser om systemets funktion kan dras bland annat eftersom enbart en planlösning har undersökts. Enbart vinter och sommarfall har undersökts, vår och höst har inte undersökts.

Nyckelord: Luftvärme, FloVENT, CFD, inomhusklimat, lågenergihus

Abstract

The ventilation system in a building may be used as a heating system by heating the supply air, a solution that has been used since the early 19th century (Bruegmann, 1978). In the 1980's decade, some houses were built with air borne heating. This provided better control of ventilation flows but it proved to be sometimes difficult to distribute the heat to all the parts of the house. If the heat does not spread throughout the building, it may be implied that neither the ventilation air does, which in turn leads to poor air quality.

One explanation for the problems with heat distribution could be that the buildings of the 1980's decade had too large power demands to successfully be heated by hot air. Houses that have much lower power demand are the ones we today call low energy buildings and a hypothesis is that air borne heating will function better in this type of buildings. Several evaluations have been conducted on such houses, but the lack of a detailed study investigating the combined heating and ventilation system to create a good indoor climate is yet to come.

In this master's thesis the thermal comfort and air quality in an apartment in a multifamily low energy building are investigated. The results are compared with the requirements and recommendations effectual in Sweden today. Thereafter air heating is evaluated out of the indoor climate perspective.

Measurements are conducted on a model in a full scale laboratory. The model represents a part of a real apartment. Simulations performed in the CFD program FloVENT are conducted on a similar object. The results of these measurements and simulations are compared to validate the method. The next step is to perform simulations on a grander model that can represent a real apartment that isn't possible to measure in the full scale laboratory. The results consist of air temperature, operative temperature, air speed, PMV and PPD as well as the air exchange efficiency and local indexes.

The comparison between simulations and measurements for the small model shows that the correlation of air temperature is very high. Air speeds have roughly good agreement, but in some points there are large discrepancies which can be explained with great sensitivity in the placement of measurement points. The air exchange efficiency and local index differs much in both measurement and simulation as well as in the comparison between them. Much of the discrepancy can be explained by that the ventilation flow varied widely during the measurements.

The results for the small model shows that PPD, predicted percentage dissatisfied, i.e the percentage who do not experience thermal comfort, is high, often 20-40 percent, while the PMV is negative indicating that the thermal climate is perceived as cool. This can possibly be remedied by increasing the target temperature and thus achieve thermal comfort. In this case, the risk of a lesser air exchange efficiency must be considered, since the ventilation's ability to remove pollutants from the occupied zone might be negatively affected.

The air exchange efficiency and local index varies but almost always meet the recommendations of 90 percent. The results from the measurements often exceed the expected values with a wide margin, sometimes even completely unreasonable results were obtained and two simulations yielded no results at all. So there is a considerable uncertainty about these quantities. Possible uncertainties and error sources have been identified during the project which should be investigated in order to draw certain generally conclusions.

The results for the large model shows good thermal indoor climate, except in single points. PPD rarely exceeds 15 percent. The reason that the PPD is so much lower than for the small model is that the input power is higher. In this model the air exchange efficiency and the local index variations aren't as big as in the small model and are consistently high.

The results indicate that in some of the studied cases thermal comfort and satisfactory air quality in terms of air exchange efficiency are achieved and in some of the studied cases thermal comfort and satisfactory air quality are not achieved, among other things, an open door between the bedroom and the kitchen provides a negative impact on the ventilation capacity to remove pollutants.

However, the results do not allow any generally conclusions about the system to be drawn, in part because of only one plan have been investigated. Only winter and summer have been investigated, spring and autumn has not been studied.

Key words: Air borne heating, FloVENT, CFD, indoor climate, low energy buildings

Innehållsförteckning

Förord	i
Sammanfattning.....	iii
Abstract	v
1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	3
1.3 Avgränsningar	3
1.4 Metod	4
2 Inneklimat.....	7
2.1 Termiskt klimat	7
2.2 Luftkvalitet	9
2.3 Vistelsezon	9
3 Ventilation	11
3.1 Omblandande ventilation	11
3.2 Ventilationssystemets effektivitet	11
3.3 Kombinerat värme- och ventilationssystem	13
4 Objektbeskrivning	15
4.1 Det fiktiva husets effektbehov och årsenergianvändning	15
4.2 Principiellt utseende på objektet	19
4.3 Mätobjekt	20
4.4 Simuleringsobjekt	25
4.5 Gemensamma variabler	28
5 Mät- och simuleringsmetod.....	31
5.1 Mätning	31
5.2 Simulering	38
6 Resultat och analys	41
6.1 Mätningar	41
6.2 Jämförelse mellan simulering och mätning	51
6.3 Simulering av lilla modellen	52
6.4 Simulering av stora modellen	57
7 Diskussion och slutsatser.....	65
7.1 Diskussion	65
7.2 Slutsats	65
7.3 Framtida undersökningar	68

Luftvärme i lågenergihus

8 Referenslista	71
8.1 Tryckta källor	71
8.2 Elektroniska källor	72
Bilaga A Tryckprovning	I
Bilaga B Avklingningskurvor från spårgasmätning	III
Bilaga C Jämförelse variabler, mätning	IX
C.1 Evakuering av överluft	IX
C.2 Flöde/temperatur	XIII
Bilaga D Jämförelse av mätning och simulering av lilla modellen	XVII
D.1 Lufttemperatur	XVII
D.2 Lufthastighet	XXIII
D.3 Lokalt ventilationsindex	XXIX
Bilaga E Simulering stora lägenheten	XXXIV
E.1 Medelstrålningstemperatur	XXXIV
E.2 PMV och PPD	XXXV
E.3 Lokal medelålder	XXXVII

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Inomhusklimatet är en viktig del i människors hälsa och välmående, två viktiga aspekter i inomhusklimatet är luftkvalitet och termisk komfort. God luftkvalitet i en byggnad uppnås genom ventilation. Ventilationen för bort fukt och föroreningar som härstammar från inredning samt människor och deras aktiviteter. Den bygger på ett luftutbyte där uteluft tillförs i vistelsezonen. God termisk komfort innebär en bra balans mellan lufttemperatur och omgivande ytors temperatur samt låga luftfarter i vistelsezonen. Det får inte heller finnas en allt för stor temperaturgradient i vistelsezonens höjdled.

Ventilationssystemet i en byggnad kan även användas som värmesystem genom att värma tilluften, en lösning som har använts sedan 1800-talets början (Bruegmann, 1978). Detta systems popularitet har varierat. Under 1980-talet byggdes en del enfamiljshus med ett från- och tilluftsystem med ett värmebatteri för att värma tilluften. Resultatet blev bättre kontroll på luftflödena jämfört med hus med enbart frånluftsventilation. Dock visade det sig vara svårt att få ut värmen i husets alla delar, speciellt i gavelrum som har större effektbehov. En öppen planlösning var erforderlig för att värmespridningen skulle fungera liksom öppna sovrumsdörrar.

I bostäder med betydligt lägre effektbehov än småhusen byggda på 1980-talet kan det tänkas fungera bättre med luftburen värme ur värmedistributionsperspektiv, helt enkelt eftersom en mindre mängd värme behöver tillsättas. Ett flerfamiljs-lågenergihus kan därför anses ha bättre förutsättningar för luftburen värme. Flerfamiljshus har mindre andel omslutande area i förhållande till golvarean och därmed ett lägre effektbehov per golvarean.

Ett lågenergihus har lägre årsenergianvändning än den av Boverket föreskrivna och byggs därför med förhållandevis välisolerade och lufttäta klimatskal samt ofta med från- och tilluftventilation med värmeväxlare, FTX-ventilation, som möjliggör värmeåtervinning. Tilluftkanalerna kan utnyttjas för att utöver ren luft även distribuera värme i bostaden genom att värma tilluften ytterligare efter värmeväxlaren. På så sätt kan installationen av ett konventionellt radiatorsystem undvikas och därmed också de, för de flesta, oestetiska radiatorerna som annars tar plats och samlar damm.

Den luftföringsprincip som generellt används i bostäder med FTX-ventilation är omblandande ventilation. Tilluften tillförs nära taket i vardagsrum och sovrum och bortförs nära taket i badrum och kök och eventuellt klädkammare. Normalt vid omblandande ventilation är tilluften något undertempererad och kastlängden bör vara cirka 75 procent av längden till motstående vägg. Denna temperaturskillnad och kastlängd ger en bra omblandning mellan tilluft och rumsluft.

Tilluftdonets placering i höjdled och tilluftens temperatur torde vara viktiga parametrar för hur ventilationsluftens rörelser ser ut i rummet och, eftersom ventilationsluften i en bostad går från rum till rum, också i hela bostaden. När övertempererad tilluft tillförs nära tak kan

Luftvärme i lågenergihus

omblandningen försämras så att luften inte blir lika ren i vistelsezonen. Eftersom den varmare luften har lägre densitet påverkas den av uppåtriktade krafter, det är därför rimligt att tro att tilluften kommer att stanna kvar i övre delen av rummet istället för att omblandas med rumsluften.

Ett erfarenhetsmässigt problem med luftvärmade bostäder är att kastlängden är för liten (Janson, 2010), vilket yttrar sig som drag när tilluftstemperaturen är lägre än rumstemperaturen då luftstrålen viker ner i vistelsezonen. Detta problem i bostäder beror på felaktig dimensionering av ventilationsdonen och brist på produkter för lämpligt flöde. Eftersom effektbehovet varierar över året måste systemet kunna hantera både över- och undertempererad luft för att inomhusklimatet ska vara bra året om. Det finns anledning att misstänka problem med vertikala temperaturgradienter och omblandning.

Mängden värme som tilluften för med sig måste vara reglerbar, detta åstadkoms genom att tilluftens flöde eller temperatur eller bådadera regleras. Normalt regleras tilluftens temperatur i lågenergibostäder gemensamt för hela lägenheten. Kök, klädkammare och badrum har normalt inte någon tilluft. Eftersom olika rum inte har samma effektbehov eller samma interna laster kan detta leda till oönskade temperaturer i vissa rum. Kök och badrum värms oftast av överluft från sovrum och vardagsrum vilket kan vara svårt om effektbehoven i dessa utrymmen är stora.

Stora skillnader i värme- och luftspridning mellan rum kan väntas beroende av om dörrar är stängda eller öppna. I värsta fall sprids inte den förvärmade tilluften i rummet på ett bra sätt varpå både ventilation och uppvärmning fallerar. Dessutom kan på samma sätt ventilation och uppvärmning falla även för de rum som saknar tilluft.

Det finns några olika exempel på utvärderade lågenergihus med luftburen värme distribuerad som tilluft via ventilationssystemet. Janson (2010) har i sin avhandling utvärderat fyra olika passivhus med luftburen värme byggda i Sverige. Sikander et al. (2011) har i sin rapport utvärderat ytterligare två hus. Brukarnas åsikter angående termisk komfort och luftkvalitet varierar men det finns problem som låga inomhustemperaturer och drag från tilluftsdon. Ett flertal olika mätningar på dessa sex objekt har gjorts, men inte någon mätning som säkerställer luftutbyteseffektivitet eller liknande.

Ett problem med att enbart titta på hur brukarna upplever inomhusklimatet är att det är svårt att veta vad de jämför med. Antag att de jämför med sin tidigare bostad och att denna bostads inomhusklimat låg långt under dagens krav för inneklimat. Brukaren kan tänkas vara nöjd med inomhusklimatet i den nya bostaden om det är bättre än i den gamla, men detta innebär inte nödvändigtvis att den nya bostaden uppfyller kraven. Omvänt kan givetvis samma problem inträffa om brukarna jämför med bostäder som har mycket bra inomhusklimat. Att även jämföra brukarnas åsikter med mätbara storheter som dessutom kan bedömas gentemot kraven är önskvärt.

En undersökning som har utvärderat temperaturskiktningar, risk för drag samt luftutbyteseffektivitet har genomförts på uppdrag av den Schweiziska Energimyndigheten, EMPA (Feist et al, 2005). Vid undersökningen har två olika tillufttemperaturer testats, 40 °C och 16 °C. Rummet kan jämföras med ett sovrum med golvarean 21 m². Tilluftflödet var konstant 30 m³/h = 8,3 l/s. Två olika utomhusförhållanden undersöktes, en mulen kall vinterdag (-10°C utomhus, 22°C inomhus och 40°C tilluft) samt en klar kall vinterdag med stor solinstrålning (-10°C utomhus, 25°C inomhus och 16°C tilluft). Undersökningen utfördes med två olika typer av väggplacerade tilluftsdon. Överluften lämnade rummet antingen under eller över sovrumsdörren.

Resultaten i den Schweiziska undersökningen visade att några komfortproblem inte uppstod i något av fallen. Luftutbyteseffektiviteten varierar mellan 45 och 57 procent för de olika testade fallen. Typ av tilluftsdon och överluftdonets placering visade sig ha en liten påverkan på komforten i rummet. Det ska understrykas att dessa resultat endast gäller för en tämligen låg tillförd effekt, 8,6 W/m² golvarea. Värmedistribution och luftutbyteseffektivitet i rum som ska värmas och ventileras med överluft undersöktes ej. Dock indikerar undersökningen att ett kombinerat ventilations- och värmesystem kan ge ett bra inomhusklimat.

Det finns alltså en del oklarheter angående ett kombinerat värme- och ventilationssystemets funktion och påverkan på inomhusklimatet. För att kunna bygga flerfamiljs-lågenergihus med luftvärme som med stor säkerhet är inomhusklimatmässigt hållbara måste detta kombinerade system utredas mer. Ett steg i detta är att utvärdera mätbara storheter och jämföra med de krav och rekommendationer som finns rörande inomhusklimat.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att bedöma termiskt klimat och luftkvalitet i en lägenhet i ett flerfamiljs-lågenergihus för att kunna svara på frågan om ett tillfredsställande inomhusklimat kan uppnås med ett kombinerat system för ventilation och värme.

1.3 Avgränsningar

För att begränsa arbetsbelastningen har endast sovrum, vardagsrum och kök i lägenheten studerats, vilket innebär att ventilationssystemet i övrigt samt andra utrymmen i lägenheten och huset har förbisetts. Det är endast inomhusklimat som står i fokus, andra aspekter som till exempel ekonomi, akustik, fukt eller energianvändning studeras inte. Dessa aspekter blir intressanta att utreda först efter att kvaliteten på inomhusklimatet är fastställd.

Centralt för arbetet har varit att lägenheten inte ska anpassas efter vilket värmesystem som ska användas. Därför har inte olika planlösningar utvärderats. Lägenheten ska vara så verklighetstrogen som möjligt och likna lägenheter som faktiskt byggs, oberoende av vilket värmesystem de har.

Luftkvaliteten inomhus påverkas mycket av bland annat kvaliteten på utomhusluften och filtrering av den samma innan den leds in i lägenheterna. Därför studeras inte luftkvaliteten i sig, utan enbart ventilationssystemets luftväxlingsförmåga.

Påverkande faktorer som inte har studerats är till exempel användande av köksfläkt, öppnandet av fönster och öppnandet av dörrar mellan rum. För att studera händelser som dessa behöver transienta beräkningar utföras, det har bedömts vara för tidskrävande och ryms därför inte i arbetet. Alla beräkningar som är utförda är jämviktsberäkningar.

Värsta fallet antas vara då dimensionerande vinterutetemperaturer gäller, därför utförs flest mätningar och simuleringar för detta fall. För att kontrollera inomhusklimatet då undertempererad tilluft används utförs även simuleringar och mätningar även för detta. Två olika utomhustemperaturer har använts men solinstrålningen har inte inkluderats.

1.4 Metod

Examensarbetet har genomförts som en kombination av simuleringar med CFD-program (Computational Fluid Dynamics) och mätningar i fullskalelaboratorium. Ett CFD-program använder numeriska metoder för att analysera temperatur- och strömningsproblem i en fluid, i detta fall luft. Kombinationen gör att CFD-resultaten kan jämföras med verkliga utfall i en mätlägenhet, vilket ger säkrare resultat. Mätningar skulle också kunna göras i verkliga lägenheter, men detta är opraktiskt och svårhanterligt eftersom det då inte är möjligt att kontrollera omgivningen.

Mätningar och simuleringar utförs till en början på ett mindre objekt som motsvarar en del av en lägenhet. Resultaten från mätningar och simuleringar jämförs och därefter utvärderas de. I nästa steg utvidgas simuleringsobjektet för att motsvara en hel lägenhet. Lägenhetens och rummets dimensioner och andra randvillkor bestäms med hjälp av ritningsunderlag som Skanska Sverige AB har tillhandahållit. Dimensioner har även anpassats för att förenkla mätning så väl som simuleringar.

Under mätningarna kyls ytterväggarna för att rätt ytemperatur ska uppnås på insidan av ytterväggarna, och därmed även ett representativt effektbehov. Ytemperaturerna är de samma som för insidan av en lågenergihusvägg vid en förutbestämd dimensionerande vinterutetemperatur.

Med hjälp av spårgasmätningar beräknas luftutbyteseffektiviteten för lägenheten och lokalt index i förutbestämda punkter. Samtidigt mäts även temperatur och luftfarter i olika punkter i rummet. För att lägenheten ska vara så lik ett riktigt objekt som möjligt justeras ventilationen för att skapa en obalans i flödena med ett svagt undertryck i lägenheten som följd. Lägenheten byggs lufttät i motsvarande mån som verkliga objekt. Lufttätheten kontrolleras med en täthetsprovning av lägenheten.

Luftvärme i lågenergihus

Följande parametrar ändras och varierar i olika mät- och simuleringsfall:

- Typ av tilluftsdon och dess placering
- Tilluft- och frånluftflöde
- Tillufttemperatur
- Överluft, över eller under dörr eller genom öppen dörr
- Interna värmelaster
- Utomhustemperatur

2 Inneklimat

Många olika faktorer påverkar inneklimatet i bostäder, två viktiga är termiskt klimat och luftkvalitet. I detta kapitel beskrivs de två nämnda faktorerna samt krav och rekommendationer som reglerar dessa.

2.1 Termiskt klimat

Lufttemperaturen är ett bra mått på det termiska klimatet eftersom den är snabb och enkel att mäta. Dessvärre ger lufttemperaturen ensam inte hela sanningen om det termiska klimatet eftersom omgivande ytors temperaturer samt luftrörelser också påverkar. Om luftrörelserna i det aktuella rummet är begränsade till låga nivåer, ger den operativa temperaturen en bra bild av den termiska komforten (Abel & Elmroth, 2008).

Den operativa temperaturen är ett medelvärde av alla ytors medeltemperatur och rumsluftens temperatur. I Boverkets byggregler (2006), 6:4 kap, ss 129-131, är krav gällande termisk komfort angivna. Den riktade operativa temperaturen skall ej understiga 18 °C i bostadsrum och temperaturdifferenser skall ej överstiga 5 K. Socialstyrelsen rekommenderar en operativ temperatur mellan 20 och 23 °C med en maximal temperaturdifferens på 3 °C samt en lufttemperatur mellan 20-24 °C (Socialstyrelsen (SOS), 2005). Enligt ISO 7730 (2005) rekommenderas att den vertikala temperaturdifferensen mellan fot och huvud inte överstiger 3 °C för en stående person.

Nilsson (2000) har sammanställt riktlinjer för det termiska inomhusklimatet från VVS Tekniska Föreningen (R1), se Tabell 1. TQ1, TQ2 och TQ3 motsvarar olika klimatklasser där TQ1 motsvarar PPD lägre än 10 procent, TQ2 motsvarar PPD är lika med 10 procent och TQ3 motsvarar PPD lika med 20 procent. PPD är andelen missnöjda med det termiska klimatet.

Tabell 1 Sammanställning av riktlinjer för det termiska klimatet (Nilsson, 2000)

Inneklimatfaktor	Faktorvärde i kvalitetsklass			
		TQ1	TQ2	TQ3
Operativ temperatur, vinterfall	Högsta värde/ °C	23,0	24,0	26,0
	Optimalvärde/ °C	22,0	22,0	22,0
	Lägsta värde/ °C	21,0	20,0	18,0
Operativ temperatur, sommarfall	Högsta värde/ °C	25,5	26,0	27,0
	Optimalvärde/ °C	24,5	24,5	24,5
	Lägsta värde/ °C	23,5	23,0	22,0
Vertikal temperaturdiff.	Vinterfall/ °C	2,5	3,0	3,0
	Sommarfall/ °C	2,5	3,0	3,0
Lufthastigheter inom vistelsezon	Vinterfall	0,15	0,15	0,15
	Sommarfall	0,20	0,25	0,40

Luftvärme i lågenergihus

Det finns en senare version av riktlinjerna från VVS Tekniska Föreningen, R1 från 2006. I denna finns det endast två klimatklasser, TQ1 och TQ2, där TQ2 istället motsvarar $PPD \leq 10$ procent. TQ1 skall uppnås med individuell reglering, dock skall $PPD \leq 10$ procent. I det här arbetet används de gamla riktlinjerna eftersom dessa mer liknar den internationella standarden med tre klimatklasser.

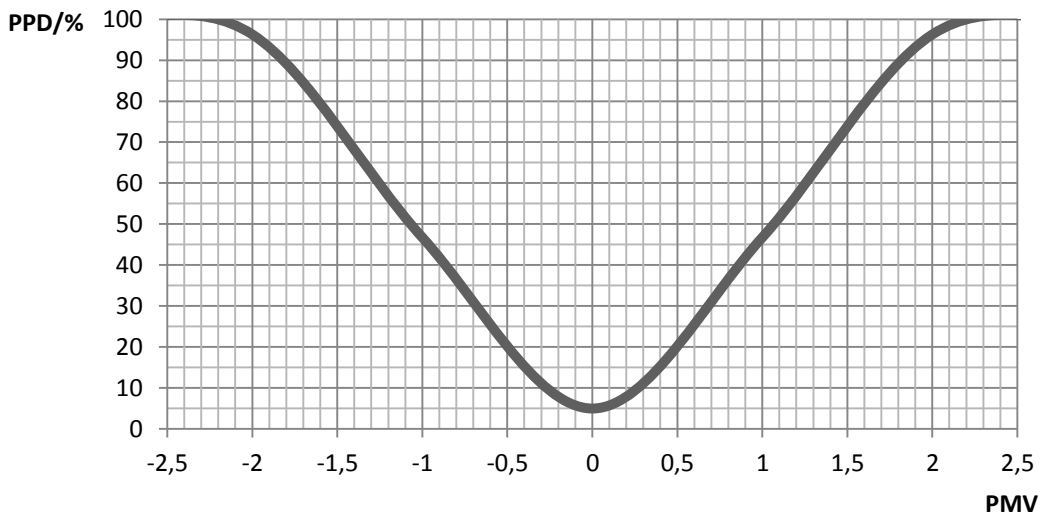
Stora temperaturskillnader i ett rum påverkar den termiska komforten negativt och klimatet upplevs som obehagligt. Vid uppvärmning via tilluften ökar risken att den varma luften stannar vid taket vilket innebär att den vertikala temperaturgradienten ökar. För stora luftrörelser ger upphov till drag som upplevs negativt, framförallt vintertid. Kallras kan uppkomma vid kalla ytor som till exempel fönsterytor.

Verktyg för att bedöma det termiska klimatet är Fangers (1997) PMV- och PPD-index som står för *Predicted Mean Vote* respektive *Predicted Percentage of Dissatisfied*. PMV anger hur en grupp människor kan förväntas bedöma det termiska inneklimatet. Detta ges på en 7-gradig skala, se Tabell 2. PMV och PPD inkluderar lufttemperatur, luftfart, omgivande ytors temperatur samt personers aktivitetsnivå och beklädnad (Abel & Elmroth, 2008).

Tabell 2 - PMV-skalan.

Åsikt	Mycket kallt	Kallt	Svalt	Lagom	Lite varmt	Varmt	Mycket varmt
Värde	-3	-2	-1	0	1	2	3

Från PMV kan PPD beräknas som beskriver andelen människor som är missnöjda med ett aktuellt inneklimat (Abel & Elmroth, 2008). PPD blir aldrig mindre än 5 procent, se Figur 1 nedan.



Figur 1 - Förhållande mellan PMV och PPD.

2.2 Luftkvalitet

Fukt, lukt och emissioner från material, inredning samt människor och deras aktiviteter är källor till försämrade luftkvalitet och bör därför ventileras bort. Ventilationsflödet bör bestämmas av mängden föroreningar som måste föras bort (Warfvinge, 1996). Ventilationskravet som Boverket ställer är 0,35 l/s per kvadratmeter golvarea, det så kallade hygienflödet.

Lokalt index och luftutbyteseffektivitet beskriver ventilationssystemets förmåga att tillföra frisk uteluft i vistelsezonen. Här finns inga krav men allmänna råd från BBR 19, 6:42 är att luftutbyteseffektiviteten bör vara minst 40 procent (Boverket, 2011). Lokalt index, som är en normalisering av luftens lokala medelålder relativt till ett perfekt omblandat system, bör vara 1 eller större. Är värdet under 1 indikerar detta på en stagnationspunkt. Mer om luftutbyteseffektivitet och lokalt index beskrivs i Kapitel 3.

2.3 Vistelsezon

Kraven för inomhusklimatet gäller för den så kallade vistelsezonen. Den definieras i BBR 19, 6:212 (Boverket, 2011) som;

"Vistelsezonen begränsas i rummet av två horisontella plan, ett på 0,1 meter höjd över golv och ett annat på 2,0 meter höjd över golv, samt vertikala plan 0,6 meter från yttervägg eller annan yttre begränsning, dock vid fönster och dörr 1,0 meter."

Dock kan det vara så att personer vistas utanför vistelsezonen, därför har ingen större vikt vid vistelsezonen lagts i det här arbetet. Mätpunkter är som närmst placerade 0,5 meter från yttervägg, annars är de placerade innanför vistelsezonen.

Luftvärme i lågenergihus

3 Ventilation

I detta kapitel beskrivs luftförlingsprincipen för omblandande ventilation, lokalt index, luftutbyteseffektivitet samt innebörden av att kombinera ett värme- och ventilationssystem.

3.1 Omblandande ventilation

Luftförlingsprincipen bygger på att tilluften blandas helt och hållet med rumsluften och att en likvärdig luftkvalitet uppnås i hela rummet. Frånluften är således en homogen blandning av rumsluft och tilluft. För att omblandande ventilation ska fungera bra krävs en bra omblandning vilket kan göras på två sätt, med termiskt styrd luftströmning eller höghastighetsteknik (Sandberg et al, 1995).

Termiskt styrd luftströmning får en omblandande effekt då undertempererad luft tillförs i rummets övre del. Eftersom tilluften håller högre densitet än rumsluften kommer den att sjunka och då blandas med rumsluften (Sandberg et al, 1995). Omvänt kan det fungera att tillföra övertempererad luft i rummets undre del. Dock är detta opraktiskt och det blir svårt att klara omblandningen under årets varmare delar.

Att skapa omblandande ventilation med höghastighetsteknik bygger på att en turbulent jetstråle skapas med följden att omkringliggande rumsluft medejekteras. Medejekteringen innebär att strålens flöde ökar med ökande längd från donet samtidigt som hastigheten minskar (Sandberg et al, 1995). Det är därför viktigt att kastlängden inte är för kort, så att tilluften når ut i hela rummet. Kastlängden får inte heller vara för lång, då finns risk att den viker ner längs väggen och ger upphov till drag i vistelsezonen. En kastlängd omkring 75 procent brukar anses väl avvägd.

En risk som förknippas med att övertempererad luft tillförs rummet i överkant är att dess förhållandevis låga densitet hindrar den från att blanda sig med rumsluften och istället lägger sig som en värmekudde i taket. Detta skulle innebära en dålig funktion för både värme- och ventilationssystem.

Placeringen av frånluften har mindre betydelse eftersom rummets luft teoretiskt är helt omblandad. Dock kan det finnas en risk för kortslutning om till- och frånluftsdonen placeras så att ombladning mellan tilluft och rumsluft inte hinner ske.

3.2 Deplacerande ventilation

En mindre vanlig luftförlingsprincip i bostäder är deplacerande ventilation. Denna princip fungerar genom att tilluften är kallare än rumsluften och tillförs rummet i nederkant i låg hastighet. När tilluften når varma objekt i rummet värms den upp varpå den stiger i rummet. Frånluftsdon placeras i rummets övre del. Luften rör sig hela tiden i en riktning och för med sig föroreningar. Luftkvaliteten är alltså bättre längre ner i rummet (Warfinge, 2007).

3.3 Ventilationssystemets effektivitet

Luftkvalitet inomhus beror dels på uteluftens kvalitet och dels på ventilationssystemets förmåga att rena uteluften samt byta ut rumsluft mot uteluft. I detta arbete har avgränsningen satts till vad som sker efter tilluftsdon och innan frånluftsdon, därför är enbart ventilationssystemets förmåga att byta ut rumsluften intressant för detta arbete. Två parametrar som passar bra för att bedöma detta är luftutbyteseffektivitet och lokalt index.

3.3.1 Luftutbyteseffektivitet

Luftutbyteseffektiviteten är ett mått på hur snabbt luften i ett rum byts ut och därmed på hur effektivt ventilationssystemet är på att föra bort luftföroreningar. För att bestämma luftutbyteseffektiviteten för ett system kan en spårgasmätning göras. Därefter utförs beräkningar för att få fram luftutbyteseffektiviteten.

Tiden det tar att i genomsnitt byta ut befintlig rumsluft vid fullständig omblandning, är lika med två gånger rumsluftens medelålder, $\langle \bar{\tau} \rangle$. Den tid det tar att byta ut luften i rummet kallas för luftutbytestiden, $\bar{\tau}_r$, och anges normalt i sekunder (Sandberg et al, 1995).

$$\bar{\tau}_r = 2\langle \bar{\tau} \rangle$$

Den i teorin kortast möjliga luftutbytestiden är lika med den nominella tidskonstanten, τ_n . Vid en ideal kolvströmning kan luftutbytestiden bli lika med den nominella tidskonstanten men detta är i praktiken omöjligt. Med andra ord tar det därför längre tid att byta ut luften. När det aktuella rummets volym, V , och det aktuella flödet, q_v , är kända kan den nominella tidskonstanten lätt beräknas.

$$\tau_n = \frac{V}{q_v}$$

Luftutbyteseffektiviteten, ε_a , definieras som kvoten mellan den nominella tidskonstanten och luftutbytestiden.

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r}$$

Med andra ord är alltså luftutbyteseffektiviteten vid den ideala kolvströmningen 100 procent och vid fullständig omblandning 50 procent.

Metodiken bakom mätning och beräkning av luftutbyteseffektivitet beskrivs i Kapitel 5.

3.3.2 Lokalt index

Det lokala indexet används för att hitta eventuella stagnationspunkter i rummet. Indexet är en normalisering av luftens lokala medelålder relativt till den nominella tidskonstanten. Ett värde på 1 eller högre visar på att det är en bra omblandning av luften i aktuell punkt medan ett värde på under 1 indikerar på en dålig omblandning (Mentor Graphics, 2011).

Lokalt index beräknas alltså som kvoten mellan den nominella tidskonstanten och luftens lokala medelålder.

$$\text{Lokalt index} = \frac{\tau_n}{\langle \bar{\tau} \rangle_p}$$

3.4 Kombinerat värme- och ventilationssystem

Traditionellt utformas värmesystemet för sig och ventilationssystemet för sig. Dessa båda system kan då fungera oberoende i stor utsträckning. Ventilationssystemets syfte är att föra bort föroreningar och eventuellt att kyla byggnaden. Ventilationssystemet kan vara utformat för att fungera bra inom ett snävt temperaturintervall på tilluften och luftbehandlingsaggregat kan behandla luften så att den ligger i rätt temperaturintervall innan den tillförs rummet. På så sätt kan en god omblandning mellan från- och tilluft säkerställas.

Värmesystemets uppgift är att distribuera värme i byggnaden. Flödet genom ett vattenburet radiatorsystem kan regleras efter värmebehovet utan att ventilationssystemets förmåga att föra bort föroreningar störs nämnvärt. Ett problem som uppstår hos värmesystem som regleras centralt är att olika rum i ett hus har olika effektbehov. När det är samma temperatur i hela systemet uppnås inte alltid den optimala termiska komforten.

I ett kombinerat värme- och ventilationssystem måste tilluftens flöde, temperatur eller de båda ändras för att tillförd effekt ska stämma överens med det aktuella effektbehovet. Eftersom luft har relativt liten värmelagringsförmåga innebär det att en stor ändring av flöde eller temperatur behövs. Höga krav på flexibilitet ställs alltså på det kombinerade systemet och vidare även på dess komponenter, som till exempel tilluftsdon för att systemet ska fungera hela året, med så väl övertempererad som undertempererad tilluft.

4 Objektbeskrivning

I detta kapitel beskrivs mätlägenheten och simuleringslägenheten, samt hur dessa har bestämts. För att kunna verifiera U-värdet på ytterväggen krävs ett resonemang som utgår från ett fiktivt hus vari lägenheten är belägen. Det fiktiva husets Årsenergiförbrukningen beräknas för att kunna jämföra det med olika kravspecifikationer till exempel BBR och passivhusstandarden.

4.1 Det fiktiva husets effektbehov och årsenergianvändning

Ett hus effektbehov utgör en viktig förutsättning för hur dess värmesystem väljs och dimensioneras. Det finns många faktorer som påverkar hur stort effektbehovet blir, som till exempel form, klimatskalets värmemotstånd och lufttätheten. I detta kapitel motiveras valda förutsättningar hos det flerfamiljshus vari den tänkta lägenheten finns.

4.1.1 Husets form

Två hus som har samma genomsnittliga U-värde kan ha mycket skiftande effektbehov per golvarea beroende på husens geometri. Ett hus med stor omslutande area får följaktligen ett högre effektbehov än ett hus med mindre omslutande area, även om golvarean är den samma. Följden av detta blir att huset med större omslutande area måste ha ett lägre genomsnittligt U-värde för att få lika lågt effektbehov som ett hus med mindre omslutande area.

Större omslutande area per golvarea är en följd av att husets plan är mer avlång, en mer kvadratisk form på husets plan ger på motsvarande vis mindre omslutande area. Vidare innebär detta att ett enskilt rum med stor andel yttervägg får ett högre effektbehov i ett hus med ett kvadratisk plan än i ett hus med långsmalt plan. Att två olika hus är lågenergihus med samma genomsnittliga effektbehov per golvarea innebär alltså inte att två likadana rum i vart ett av dessa hus har samma effektbehov, vilket är viktigt att komma ihåg då effektbehov i enskilda rum diskuteras.

I ett rum med högre effektbehov behövs ett högre luftflöde eller en högre tilluftstemperatur än i ett rum med lägre effektbehov. Av den anledningen väljs formen på husets plan nära kvadratisk för att ge värsta fallet för luftburen värme i ett lågenergihus. I Tabell 3 nedan visas alla dimensioner för det fiktiva lågenergihuset.

Tabell 3 - Dimensioner för det fiktiva huset.

Det fiktiva husets egenskaper

Antal plan	6 st
Ett plans dimensioner	20 x 30 m ²
Våningshöjd	2,7 m
Golvarea	3600 m ²
Fasadarea	1620 m ²

4.1.2 Husets läge

Orten Östersund som är belägen i klimatzon 1 har valts för att huset ska kunna vara ett lågenergihus i större delen av landet. Dimensionerande vinterutetemperatur, DVUT i Östersund är $-25,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Enligt Sveriges Geologiska Undersökning, SGU (2012), är den vanligaste jordarten lerig morän, denna jordart har använts vid effekt- och energiberäkningar.

4.1.3 Övriga förutsättningar

För mät- och simuleringsobjekt har en mulen vinterdag valts med DVUT rådande. Fallen då undertempererad luft tillförs lägenheten är de interna lasterna så pass höga att ingen ytterligare värme behöver tillföras alternativt råder en hög utetemperatur, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.1.4 Beräkning av effektbehov

Effektbehovet anges i W och utgörs av transmissions-, läckage- och ventilationsförluster (Warfvinge, 2007). Transmissionsförluster innefattar värmeledning genom byggnadsdelar och beräknas enligt formeln

$$P_{trans} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

där

U är U-värdet för den aktuella byggnadsdelen i $W/(m^2 \cdot K)$

A är byggnadsdelens area i m^2

ΔT är temperaturskillnad mellan inne och ute i K

Transmissionsförlusterna innefattar även förluster härledda till köldbryggor, dessa förluster innefattas inte av formeln ovan utan brukar beräknas för sig. I detta fall väljs att endast uppskattats dessa till 10 % av övriga transmissionsförluster.

För att beräkna läckageförluster måste först läckageflödet beräknas. Läckageflödet beräknas enligt (FEBY 12, 2012):

$$q_{l\ddot{a}ckage} = \frac{q_{50} \cdot e}{\left(1 + \frac{f}{e} \left(\frac{q_{sup} - q_{ex}}{q_{50}}\right)^2\right)}$$

där

$q_{l\ddot{a}ckage}$ är läckageflödet i l/s

q_{50} är läckageflödet vid 50 Pa tryckskillnad i l/s

q_{sup} är tilluftsflödet i l/s

q_{ex} är frånluftsflödet i l/s (sätt till 5 % mer än tilluftsflödet)

e är 0,07 (vindskyddskoefficient enligt EN ISO 13789:2008)

f är 15 (vindskyddskoefficient enligt EN ISO 13789:2008)

Luftvärme i lågenergihus

Därefter kan läckageförlusterna beräknas enligt (Warfvinge, 2007):

$$P_{läck} = \rho \cdot c_p \cdot q_{läck} \cdot \Delta T$$

där

ρ är luftens densitet, cirka $1,2 \text{ kg/m}^3$

c_p är luftens värmekapacitet, cirka 1000 J/kg

$q_{läck}$ är läckageflödet i m^3/s

ΔT är temperaturskillnaden mellan ute och inne i K

På motsvarande sätt beräknas ventilationsförlusterna, med skillnaden att det även antas finnas en värmeväxlare. Verkningsgraden hos värmeväxlaren har antagits till 85 procent. Ventilationsflödet har vi antagit till cirka $0,7 \text{ l/s m}^2$, alltså dubbelt så mycket som BBR (Boverket, 2011) kräver, eftersom högre ventilationsflöden kommer att undersökas.

$$P_{vent} = \rho \cdot c_p \cdot q_{vent} \cdot \Delta T \cdot (1 - v) \cdot d$$

där

v är värmeväxlarens verkningsgrad (0-1)

d är relativ drifttid (0-1)

För samtliga beräkningar har utetemperaturen DVUT använts, alltså $-25,3 \text{ }^\circ\text{C}$ och innetemperaturen $22 \text{ }^\circ\text{C}$.

Väggtypen som utformas är av typen VAB12, som är en standardvägg från Skanska. Väggen består inifrån av 120 mm betong, 150 mm isolering (PIR, $\lambda = 0,026 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$), luftspalt och fasadtegel.

I tabell 4-6 nedan visas resultaten av beräkningarna.

Tabell 4 – Transmissionsförluster för respektive byggdel.

Byggdel	Area/ m^2	U-värde/ $(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}))$	Förlust/ W
Yttervägg	1080	0,167	8 531
Fönster och dörr (15 % av golvarea)	540	0,9	22 988
Tak	600	0,1	2 838
Grund 0-1 m	96	0,17	772
Grund 1-6 m	360	0,14	2 384
Grund 6- m	144	0,13	885
Köldbryggor (40 % av övriga)	-	-	15 359
Totala transmissionsförluster	-	-	53 757

Tabell 5 - Beräknade flöden och förluster för ventilation och läckage.

Luftströmning	Flöde/ (m ³ /s)	Förlust/ W
Ventilation	2,520	21 455
Läckage	0,0103	585

Tabell 6 - Alla effektförluster.

Effektförlust	Förlust/ W
Transmission	53 757
Ventilation	21 455
Läckage	585
Totalt	75 797

Totalt effektbehov blir $21,05 \text{ W/m}^2 A_{temp}$. Byggnadens specifika värmeförlust blir 1602 W/K .

4.1.5 Beräkning av årsenergianvändning

När årsenergiförbrukningen för ett hus ska beräknas kan gradtimmemetoden tillämpas. Energiförbrukningen beräknas enligt

$$E = Q_{tot} \cdot G_T$$

där

Q_{tot} är specifik värmeförlust i $\text{W}/^\circ\text{C}$

G_T är gradtimmar i $^\circ\text{C}h$

För att välja antalet gradtimmar för en viss ort behöver ett antagande om grätiseffekt, P_{gratis} , samt en beräkning av aktuell gränstemperatur, T_g göras. Enligt FEBY 09 kan P_{gratis} antas till 4 W/m^2 . T_g beräknas enligt Warfvinge (2007)

$$T_g = T_{inne} - \frac{P_{gratis}}{Q_{tot}}$$

T_g beräknas till $13,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

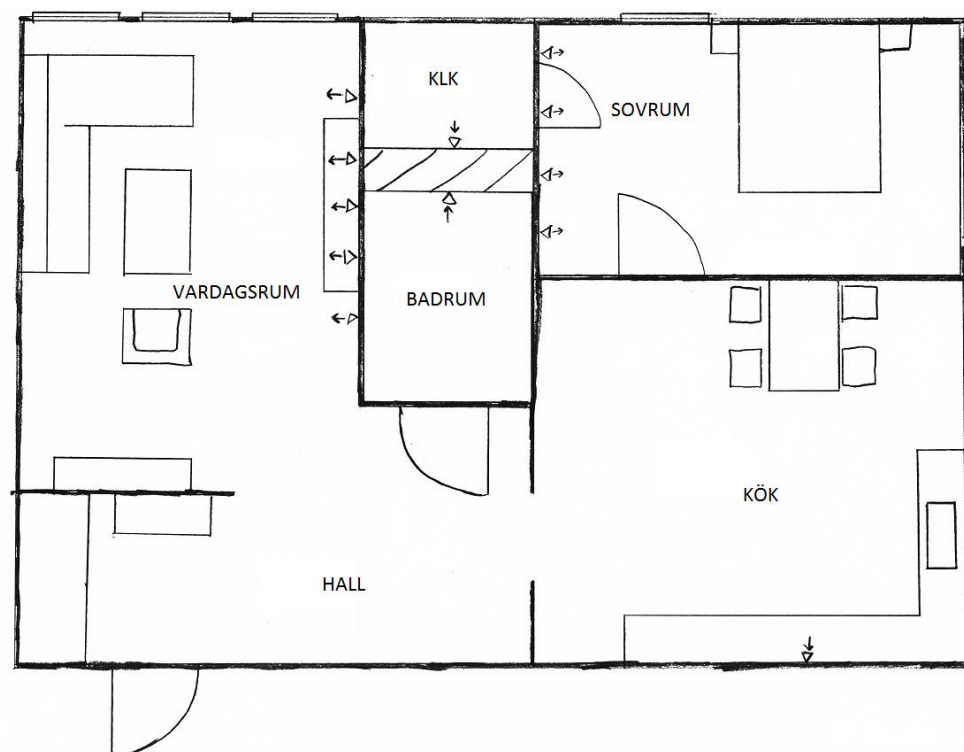
När T_g är känd kan gradtimmar tas fram ur Johanssons (2010) sammanställning över gradtimmar. Aktuellt antal gradtimmar är $94\,845,6 \text{ }^\circ\text{C}h$. Årsenergianvändningen för uppvärmning beräknas till $151\,943 \text{ kWh}$. I den totala årsenergianvändningen ingår även energianvändning för tappvarmvatten som kan sättas till $25,0 \text{ kWh/m}^2 A_{temp}$ (FEBY 12). Årsenergianvändning beräknas slutligen till $67,2 \text{ kWh/m}^2 A_{temp}$ exklusive fastighetsel. Denna siffra kan jämföras med kravet för passivhus som i klimatzon 1 är 29 eller 58

$kWh/m^2 A_{temp}$ beroende på vilket eller vilka energislag som används för uppvärmning (FEBY, 2012) och BBR:s krav på 95 eller $130 kWh/m^2 A_{temp}$ beroende på vilket energislag som används för uppvärmning (Boverket, 2011).

4.2 Principiellt utseende på objektet

Det rum i en lägenhet som har störst effektbehov och också störst behov av att faktiskt få sitt effektbehov tillgodosett är ett sovrum som ligger i ett ytterväggshörn. Ett sovrum vistas brukare i under lång tid med låg aktivitetsnivå och dessutom med låga interna värmelaster. Detta är alltså värsta fallet. Lägenheten tänks ligga i mitten av byggnaden med likadana lägenheter över och under sig.

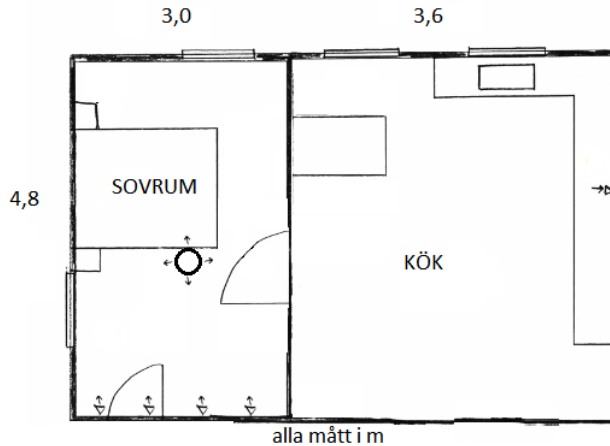
En annan svårighet i en lägenhet som värms via ventilationssystemet är de rum man normalt inte har tilluft i, till exempel ett kök. Ett kök värms upp med hjälp av interna laster samt luft som kommer från sovrum och vardagsrum, för att göra det svårare för systemet har ett stort fönster och en balkongdörr satts in i köket för att öka effektbehovet. Dessa två förutsättningar har varit styrande då planlösningen till lägenheten tagits fram, se Figur 2 nedan.



Figur 2 - Lägenheten.

4.3 Mätobjekt

Mätobjektet begränsas av de yttre mått som gäller för fullskalelaboratoriet, 7,5 x 5 x 2,4 meter. Vid färdigställandet av testlägenheten var de invändiga måtten som har använts 6,52 x 4,81 x 2,4 m. Den tillgängliga ytan är för liten för att rymma hela objektet, därför skapas endast en del av det. För att täcka värsta fallet (avseende uppvärmning) skapas sovrum och kök. Objektets två ytterväggar byggs upp så att en luftspalt skapas mellan dem och två kylväggar som finns i labbet. Luftspalten är cirka 100 mm bred och motsvarar utomhus under mätningarna. Mätlägenhetens planlösning och mått visas i Figur 3.



Figur 3 - Mätobjektet.

Fönster och altandörr har dimensionerna 1 x 1,2 m respektive 1 x 2 m.

Mätlägenhetens ytterväggar är mycket tunnare än i det verkliga fallet eftersom den verkliga dimensionerande vinterutetemperatur, DVUT, är alldeles för kall för att återskapa i laboratoriet. Väggarna består av reglar, spånskivor och cellplast. Fönstren görs genom att såga ett hål i spånskivan och sedan täcka det med plastfolie. Temperaturen mäts kontinuerligt i spalten under mätningarna. För att beräkna tjocklek på isolering och spånskiva måste ytövergångsmotståndet vara kända.

4.3.1 Ytövergångsmotstånd

Viktigt att tänka på vid beräkningen av U-värde hos testlägenhetens väggar är att det yttre värmemotståndet, R_{se} , inte kan sättas till $0,04 (m^2 \cdot K)/W$ som är brukligt. Detta beror på att det i laboratoriet inte finns någon strålning från en klar himmel, i princip finns det inte heller någon vind. Istället beräknas ett nytt R_{se} i en spalt enligt Sandin (1996) där konvektionen utgör den dominerande faktorn istället för strålningen. För att genomföra beräkningen antas temperaturer i modellen enligt Tabell 7.

Tabell 7 - Antagna temperaturer.

Plats	Temperatur/ °C
Yta innervägg	21,0
Yta insida yttervägg	20,5
Yta insida fönster	16,0
Yta utsida yttervägg	12,0
Yta kylvägg	7,0
Luft inne	22,0
Luft i spalt	11,0

För att kunna beräkna värmemotståndet behövs kännedom om värmeövergångskoefficienter på grund av strålning och konvektion, α_s respektive α_k , anges i $W/(m^2 \cdot K)$. Dessa beräknas med hjälp av de antagna temperaturerna, ett antagande av emmittans ε_{12} samt Boltzmanns konstant σ_s . Ekvationer enligt Sandin (1996).

$$\alpha_s = 4 \cdot \varepsilon_{12} \cdot \sigma_s \cdot T_m^3$$

$$\alpha_k = 2 \cdot |T_l - T_o|^{1/4}$$

där

T_m är medeltemperaturen av de motstående ytorna

T_l är lufttemperatur

T_o är ytemperatur

Därefter kan värmemotståndet, i $(m^2 \cdot K)/W$, beräknas enligt

$$R = \frac{1}{\alpha_s + \alpha_k}$$

Även det inre värmemotståndet R_{si} , som brukligt sätts till 0,13 $(m^2 \cdot K)/W$, kan beräknas på samma sätt. Resultatet av beräkningarna redovisas i Tabell 8.

Tabell 8 - Beräknade värmeövergångsmotstånd

Parameter	$\alpha_s/$ (W/m ² K)	$\alpha_k/$ (W/m ² K)	R/ (m ² K/W)
R _{se}	4,09	2,38	0,16
R _{si, vägg}	4,75	2,21	0,14
R _{si, fönster}	4,64	3,13	0,13

4.3.2 Mätlägenhetens vägg tjocklek

Tjockleken på mätlägenhetens ytterväggar beräknas med hjälp av värmeövergångsmotstånden. Cellplastens tjocklek beräknas till 40 mm, med värmeledningsförmågan $\lambda = 0,038 W/(m \cdot K)$. Spånskivans tjocklek beräknas till 10 mm med värmeledningsförmågan $\lambda = 0,14 W/(m \cdot K)$. Transmissionsförlusterna genom denna

vägg vid utetemperaturen 11 °C blir de samma som genom den verkliga väggen med utetemperaturen -25,3 °C. Övriga areor som begränsar mätlägenheten från laboratoriet isoleras för att säkerställa att inget värmeflöde ska finnas därigenom. Enbart en liten mängd isolering krävs här eftersom det i stort sett är samma temperatur i mätlägenheten som i laboratoriet. Som fönster används endast byggplast där övergångsmotstånden är den enda isoleringen.

4.3.3 Ventilationsdon

I mätningarna används två typer av tilluftsdon, en väggmonterad prototyp och ett takplacerat don. Donen tillverkas av Swegon AB. Vägdonet ger en koncentrerad jetstråle som medejekterar stillastående luft. Av patentskäl kan inte en bild av prototypen visas i denna rapport. Teorin bakom donets utformning är att en liten cirkulär mynning ger en hög utloppshastighet som medger en större medejektering av rumsluften vilket i sin tur leder till en bättre omblandning. Vägdonen är placerade ca 70 mm från taket (till centrum av donmynning). Takdonet är av typen konspridare med produktnamnet *Falcon a 125* med anslutningslåda *ALS 100-125*, se Figur 4. Donet justeras så att en horisontell spridning uppstår.



Figur 4 - Tak donet Falcon a 125.

Luftvärme i lågenergihus

Som frånluftsdon används Swegons *CKPa 100* som egentligen är ett tilluftsdon, se

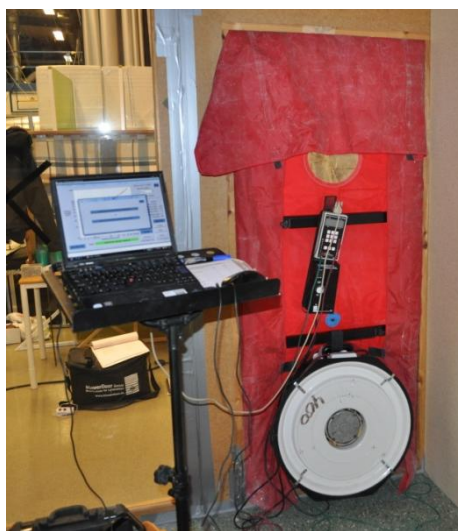
Figur 5. Att donet inte är ett frånluftsdon har i vår undersökning ingen betydelse.



Figur 5 - Frånluftsdonet CKPa 100.

4.3.4 Lufttätet

För att ge en så verklig modell som möjligt läggs tid på lufttätningen. Skarvar, hål och fönster tejpas, plastas och spacklas. Målvärdet är Skanskas standardvärde på $0,3 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ vid 50 Pa tryckdifferens. Tryckprovning utförs med en så kallad *Blower Door* enligt EN13829, metod B, se Figur 6.



Figur 6 - Tryckprovningen utfördes med en Blower door.

Resultatet från tryckprovningen ges i

Tabell 9.

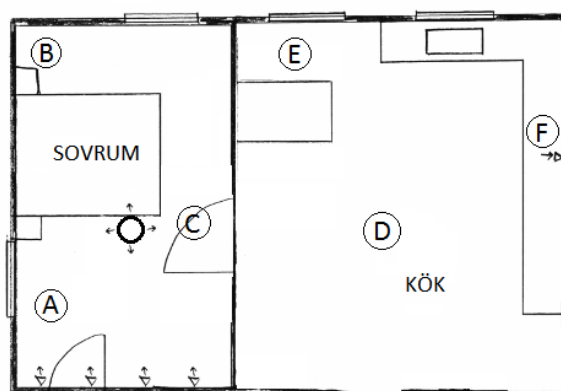
Tabell 9 - Resultat från tryckprovningen.

Provning	Läckageflöde/(l/(s · m ²))
Undertryck 50 Pa	0,32
Övertryck 50 Pa	0,18
Medel	0,25

Medelvärdet på 0,25 l/(s · m²) anses uppfylla målet för lufttätethet. Rapporten från tryckprovningen återfinns i Bilaga A.

4.3.5 Mätpunkter

I testlägenheten placeras fem stativ ut (A-E), vardera med tre sensorer i olika höjder. Placeringarna ges av Figur 7. Sensorerna mäter temperatur och luftfart. Höjderna som sensorerna sitter på är 0.1, 1.1 och 2.0 meter över golv. I varje punkt (A-E) mäts även spårgaskoncentrationen över tiden, denna mätning görs på höjden 1,1 meter över golv. I punkten F mäts spårgaskoncentrationen i frånluften för att ge ett medelvärde för hela lägenheten.



Figur 7 - Planlösning för mätobjektet med mätpunkter A-F utsatta.

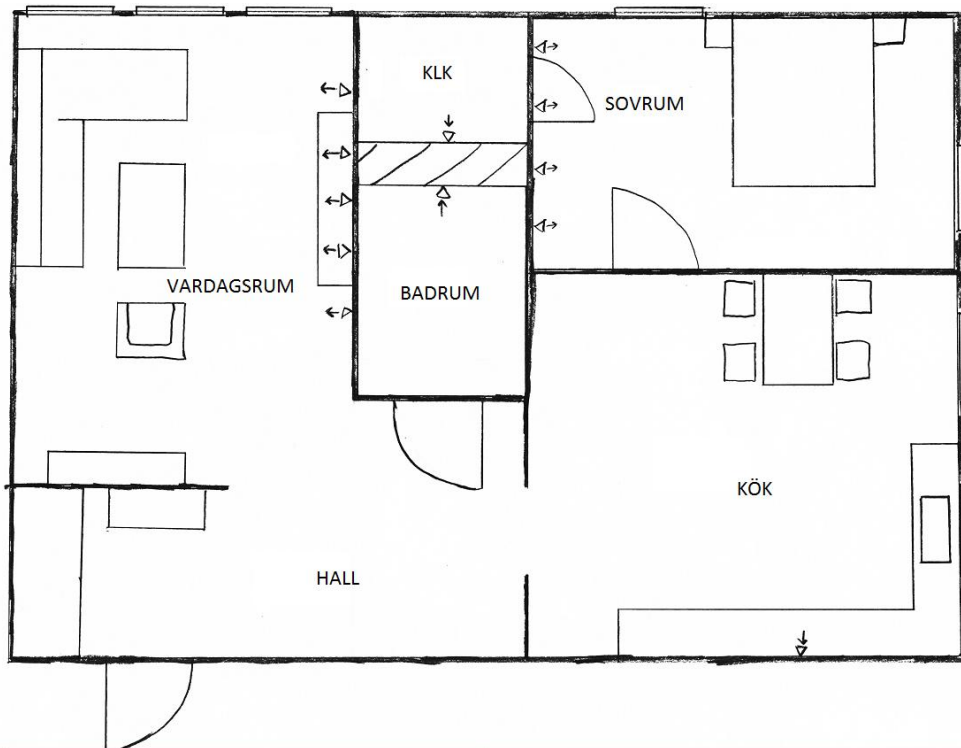
Koordinater för kontrollpunkter i den lilla modellen redovisas i Tabell 10. Origo är nere i vänstra hörnet av sovrummet och utgår från de invändiga måtten. Höjderna över golv för punkterna framgår av punktens namn.

Tabell 10 - Mätpunkternas koordinater i mätlägenheten

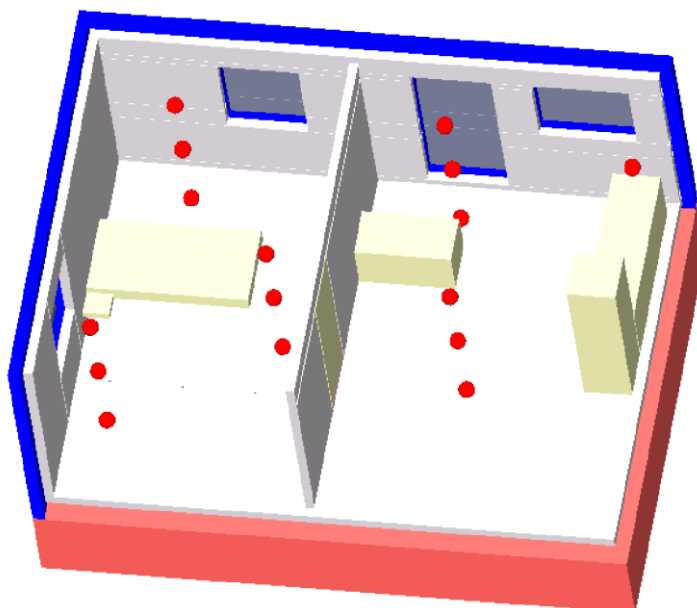
Koord.	A			B			C			D			E		
	0.1	1.1	2.1	0.1	1.1	2.0	0.1	1.1	2.0	0.1	1.1	2.0	0.1	1.1	2.0
X/m	0,5			1			2,5			4,8			4		
Y/m	1,3			3,8			2,2			1,8			4,3		

4.4 Simuleringsobjekt

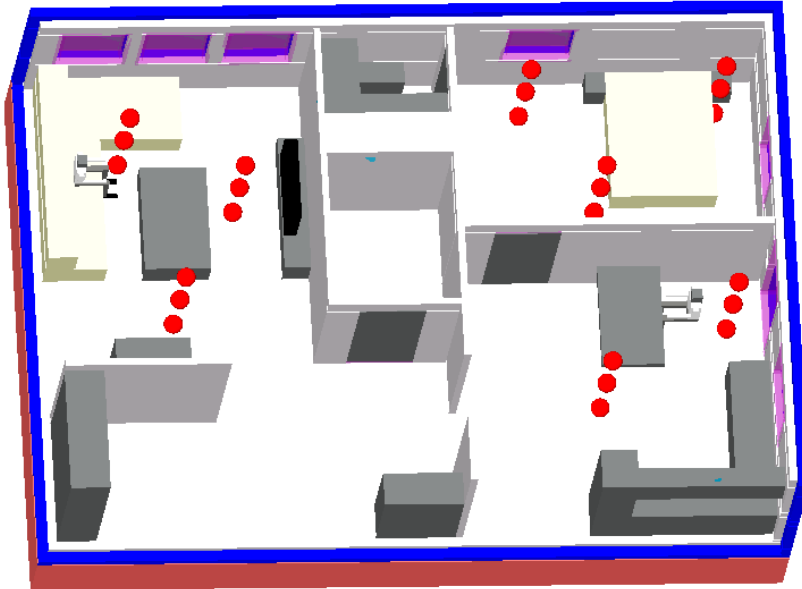
Två modeller skapas. En modell motsvarar mätobjektet, se Figur 3, och en större modell som kan anses mer representativ som en hel lägenhet, se



Figur 2. Hädanefter kommer de två modellerna att benämnas "den lilla" respektive "den stora" modellen, se Figur 8 och Figur 9 nedan.



Figur 8 - Mätpunkternas (röda bollar) placering i den lilla modellen.



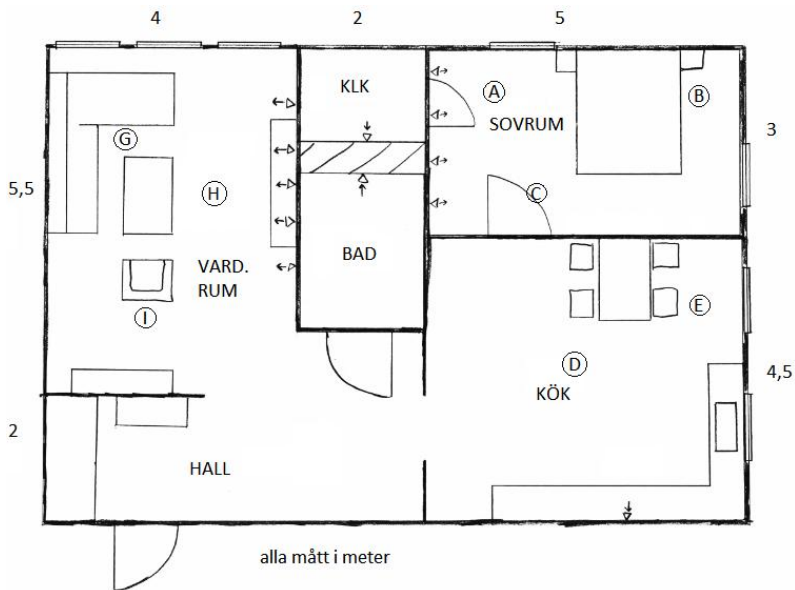
Figur 9 - Mätpunkternas (röda bollar) placering i den stora modellen.

Tillvägagångssättet för skapandet av de båda modellerna är detsamma. Väggar och fönster med beräknade U-värden skapas och givna förutsättningar skrivs in som gränsvillkor. Till skillnad från mätningarna används utetemperaturen $-25,3\text{ °C}$. Innerväggar och inredning läggs in. Donen som modelleras kalibreras i FloVENT® så att de motsvarar donen som används vid mätningen med avseende på utloppshastighet och kastlängd. Programmets egen funktion för att skapa beräkningsceller, grid, används.

4.4.1 Mätpunkter

För att lättare kunna jämföra olika scenarier med varandra sätts kontrollpunkter ut i modellen. Höjder där inneklimateparametrarna mäts är 0.1, 1.1 samt 2.0 meter från golvnivå. Mätpunkter placeras även vid till- och frånluftsdonen för att kontrollera inlopps- och utloppstemperaturer. Mätpunkterna i den lilla modellen är desamma som i mätlägenheten, se Figur 7 och Figur 8. I Figur 10 nedan redovisas kontrollpunkternas placering i den stora modellen.

Luftvärme i lågenergihus



Figur 10 - Mätpunkter A,B,C,D,E,G,H och I i den stora modellen.

Koordinater för mätpunkter i den stora modellen redovisas i

Tabell 11. Origo är nere i vänstra hörnet och utgår från invändiga mått. Punktens höjd framgår av namnet. Punkten F är medvetet bortvald eftersom den motsvarar spårgasmätning i frånluften i mätlägenheten.

Tabell 11 - Mätpunkternas koordinater i den stora modellen.

Koord.	A			B			C			D			E		
	0.1	1.1	2.1	0.1	1.1	2.0	0.1	1.1	2.0	0.1	1.1	2.0	0.1	1.1	2.0
X/m	7,51			10,45			8,57			8,49			10,46		
Y/m	6,96			6,98			5,17			2,03			3,28		

Koord.	G			H			I		
	0.1	1.1	2.1	0.1	1.1	2.0	0.1	1.1	2.0
X/m	1,22			2,91			1,92		
Y/m	6,34			5,23			3,45		

Utdata ges i både grafisk och tabellerad form. Parametrar som studeras är:

- Lufttemperatur
- Yttemperatur
- Operativ temperatur
- Luftfart
- PMV och PPD
- Luftens lokala medelålder

- Lokalt index

Vid beräkning av PMV och PPD krävs viss indata till FloVENT®, aktivitetsnivå och beklädnad. Aktivitetsnivån sätts till 58 W/m^2 vilket motsvarar låg aktivitet för en sittande person (Fanger, 1997). Beklädnad antas till 1 clo eller $0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

4.5 Gemensamma variabler

Eftersom mätningar ska jämföras med simuleringar kommer vissa variabler att varieras i både mätning och simulering. Dessa variabler är;

- Typ av don, vägg- eller takplacerat don.
- Överluftens förläggning, över eller under stängd sovrumsdörr eller genom öppen sovrumsdörr.
- Tilluftstemperatur och tilluftsflöde.

4.5.1 Tilluftstemperatur och tilluftsflöde

Vid jämviktsberäkningar är ändringar av tilluftstemperaturen proportionella mot tilluftsflödet. Detta beror på att det fortfarande är samma effektbehov som råder. Effekten, anges i W , som luften innehåller beräknas enligt följande:

$$Q = \rho_{\text{luft}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{tilluft}} - T_{\text{rum}}) \cdot q$$

där

ρ_{luft} luftens densitet, $1,2 \text{ kg/m}^3$

c_p luftens specifika värmekapacitet, $1000 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$

Om effektbehovet är känt kan flöde och tilluftstemperatur beräknas. Maximalt antal tilluftsdon i sovrummet är sex stycken som vardera har ett tilluftsflöde på 5 l/s . Alltså blir det maximala flödet i sovrummet, liksom 30 l/s . Lägsta möjliga flöde är hygienflödet, efter att detta flöde justerats för att vara jämnt delbart med 5 l/s blir lägsta flödet för den lilla respektive den stora modellen 15 l/s och 30 l/s . Rumstemperaturen är $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Effektbehovet för den lilla respektive den stora modellen har beräknats till cirka 411 W och 712 W vid DVUT. Resultat av beräkningar redovisas i Tabell 12.

Tabell 12 - Beräknad tillförd effekt vid kända flöden och temperaturer.

Objekt	Tilluftstemperatur/ °C	Tilluftflöde/ (l/s)	Tillförd effekt/ W
Mätlägenhet och lilla modellen	45	15	411
	34	30	432
	18	15	-72
Stora modellen	42	30	720
	31	65	702
	18	30	-144

Luftvärme i lågenergihus

Även fall med undertempererad tilluft testas. I den lilla modellen och tillika mätobjektet simuleras en hög intern värmelast, 525 *W*. Tilluftstemperaturen är 18 °C vid minimiflödet 15 *l/s*. I den stora modellen simuleras istället en varm, mulen sommardag med en utomhustemperatur på 25 °C. Tilluftstemperaturen är då 18 °C och flödet 30 *l/s*.

5 Mät- och simuleringsmetod

I detta kapitel beskrivs tillvägagångssättet för analyser och beräkningar.

5.1 Mätning

Under mätningarna kommer lufttemperatur och luftfart att mätas i de femton mätpunkterna, och spårgaskoncentrationen i de sex mätpunkterna som tidigare har beskrivits. Spårgasmätningar kommer att utföras i syfte att beräkna luftutbyteseffektivitet och lokalt index. Tillvägagångssättet för spårgasanalys och beräkning av luftutbyteseffektivitet beskrivs i följande avsnitt.

5.1.1 Mätfall

Totalt utförs 11 olika mätfall i mätlägenheten. Förutsättningarna för de olika mätfallen listas i Tabell 13.

Tabell 13 – Förutsättningar för mätfallen

Mätfall	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Dontyp	V	V	V	V	T	T	T	T	T	V	V
Tillufttemperatur/ °C	34	34	45	18	34	34	45	18	34	34	45
Tilluftflöde/ (l/s)	30	30	15	15	30	30	15	15	30	30	15
Överluft	U	Öv	U	U	U	Öv	U	U	Öp	Öp	Öp

Förklaring: V-väggdon, T-takdon, U-under dörr, Öv-över dörr, Öp-Öppen dörr

I fall 4 och 8 råder en stor intern värmelast. I normala fall är det en större värmelast i kök jämfört med sovrum och därför är värmelasten större i köket även i dessa fall. Värmelasterna under mätningarna motsvaras av dockor, lysrör och glödlampor. Uppdelning av värmelasterna ges av Tabell 14.

Tabell 14 - Uppdelning av de interna värmelasterna i mätfall 4 och 8.

Sovrum	Effekt /W	Kök	Effekt /W
1 x Docka	100	2 x Docka	200
2 x Lysrör	100	2 x Lysrör	100
		2 x Lampa	25
Total effekt i rum	200	Total effekt i rum	325

Den totala interna värmelasten är större än det ursprungliga effektbehovet på 411 W. Skillnaden i effekt är tänkt att motsvara effektbehovet som uppstår på grund av att det är undertempererad tilluft som behöver värmas. I alla övriga fall finns ingen intern värmebelastning. I Figur 11 syns dockorna som användes vid mätningarna.



Figur 11 - Två dockor som vardera avger 100 W.

5.1.2 Spårgasmätning

Metoden som används för att beräkna luftutbyteseffektiviteten i projektet är framtagen av Mats Sandberg et al (1995). Mättnings- och beräkningsmetodiken bakom luftutbyteseffektiviteten sammanfattas nedan. Svavelhexafluorid användes som spårgas.

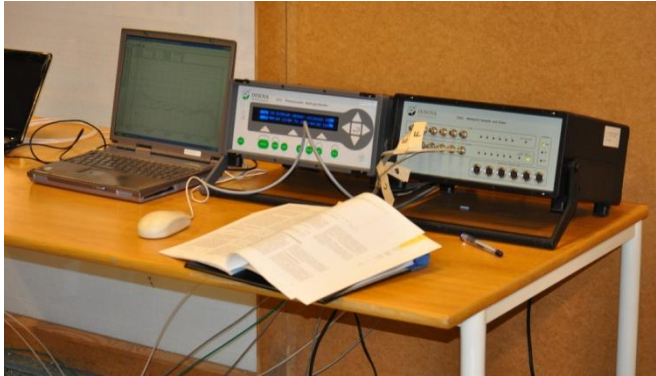
Spårgasen fördelas jämnt i rummet med hjälp av skivor som viftas frenetiskt en kort stund vid mätningens början varpå dess avklingande koncentration mäts över tiden med en gasanalysator. När det är luftutbyteseffektiviteten som ska beräknas mäts koncentrationen vid frånluftsdonen. Ett diagram som visar spårgaskoncentrationens avtagande med tiden, en avklingningskurva, skapas och med hjälp av denna kan luftutbyteseffektiviteten beräknas. Eftersom lägenheten inte har en perfekt omblandning av luften kommer inte koncentrationen att avklinga exponentiellt till en början. Mätningen kan först avbrytas när avklingningskurvan är exponentiell. För att kunna notera detta måste mätvärdena presenteras i ett lin-log diagram under mätningen och när mätvärdena bildar en rät linje är kurvan exponentiell och mätningen kan avbrytas. När det finns mer än ett frånluftsdon måste spårgaskoncentrationen mätas i vart och ett av dessa för att luftutbyteseffektiviteten ska kunna beräknas.

Vid spårgasmätningen i detta projekt placeras mätpunkter i fem olika punkter, på stativen för temperatur- och hastighetsgivarna, på 1.1 meters höjd. En mätpunkt placeras i frånluftsdonet, mätpunkt F enligt Figur 7, och datan från denna punkt kommer att användas för att beräkna luftutbyteseffektiviteten. Övriga punkter ger lokala värden på luftens medelålder, som används för att beräkna lokala index.

Spårgasanalysatorn kommer ifrån Innova AirTech Instruments och består av en *Multipoint Sampler*, en *Multi-gas Monitor* samt tillhörande programvara och slangar. *Samplern* har sex

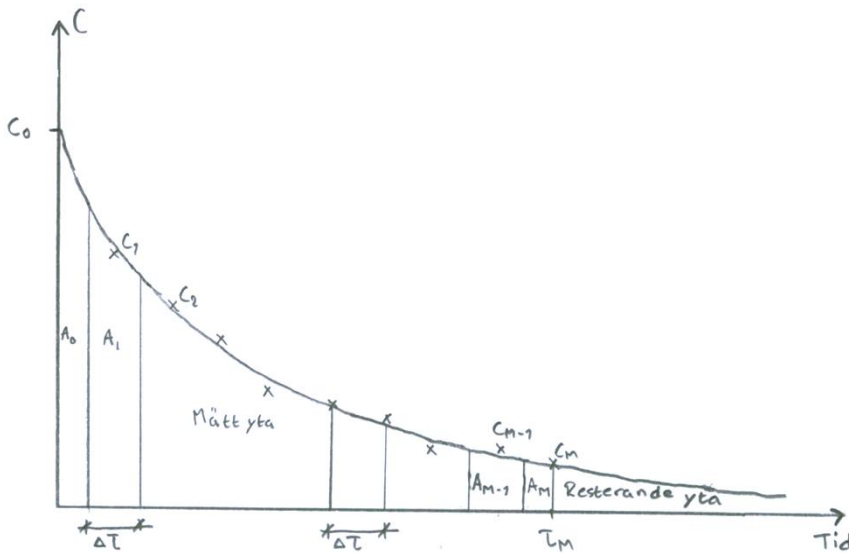
Luftvärme i lågenergihus

stycken gasintag vilket innebär att gas kan tas ifrån sex olika punkter och i slutänden fås sex olika kurvor. Spårgasutrustningen visas i Figur 12.



Figur 12 - Spårgasutrustningen.

I analysen av mätdatan anpassas en avklingningskurva till mätvärdena och ytan under kurvan tas fram. I Figur 13 visas ett exempel på en anpassad avklingningskurva.



Figur 13 - Exempel på en anpassad avklingningskurva. Den sista mätningen C_M gjordes vid tiden τ_M . Tidsintervallet mellan mätningarna var $\Delta\tau$.

Ytan under avklingningskurvan ges av integralen:

$$Yta = \int_0^{\infty} C d\tau$$

Luftvärme i lågenergihus

Ett approximativt sätt att lösa ytingegralen är att dela upp ytan i flera delytor, A_0, A_1, A_2 o.s.v. där varje uppmätt koncentration, C_0, C_1, C_2 o.s.v. representerar en delyta. Dessa delytor summeras och den totala ytan erhålls. Ytingegralen kan då förenklas till:

$$\sum C_i \cdot \Delta\tau$$

där

$\Delta\tau$ är tidssteget och antas vara konstant.

Mätningen avbryts innan koncentrationen har sjunkit till noll, helt enkelt eftersom en exponentiell funktion aldrig kan bli noll. Efter mätningens avbrytande extrapoleras kurvan linjärt vilket utgör en god approximation. Därför blir det två delar av den totala ytan som måste beräknas; en mätt yta och en resterande yta. Den första och sista delytan, A_0 respektive A_M , bör vid summering justeras eftersom deras tidsintervall endast är hälften av övriga delytors intervall, det vill säga $\Delta\tau/2$. Den uppmätta ytan blir då:

$$\text{Mätt yta} = \Delta\tau \cdot \sum_{i=1}^{M-1} C_i + \frac{\Delta\tau}{2} \cdot (C_0 + C_M)$$

med beteckningar enligt Figur 13.

Den resterande ytan måste beräknas på ett annat sätt. Eftersom det är en exponentiell avklingning mot noll kan kurvan beskrivas med formeln:

$$C = C_M \cdot e^{-\lambda_{exp} \cdot \tau'}$$

där

τ' är tiden efter sista mätningen, $\tau' = 0$ vid $\tau = \tau_M$

Uttrycket kan förenklas till:

$$\text{Resterande yta} = \frac{C_M}{\lambda_{exp}}$$

där λ_{exp} beräknas genom att plotta mätvärdena i ett lin-log diagram och uppskatta de sista värdena med en rät linje, λ_{exp} är lutningen på denna linje. Den totala ytan under avklingningskurvan erhålls alltså sedan efter att den uppmätta och den resterande ytan summeras. Tiden det tar att i genomsnitt byta ut befintlig rumsluft, (fullständig omblandning), är lika med två gånger rumsluftens medelålder, $\langle \bar{\tau} \rangle$. Den tid det tar att byta ut luften i rummet kallas för luftutbytestiden, $\bar{\tau}_r$, anges i s (Sandberg et al, 1995, s35).

$$\bar{\tau}_r = 2\langle \bar{\tau} \rangle$$

Luftvärme i lågenergihus

Grundekvationen för rumsluftens medelålder $\langle \bar{\tau} \rangle$, anges i s , ser ut som följande:

$$\langle \bar{\tau} \rangle = \frac{\int_0^{\infty} \tau C d\tau}{\int_0^{\infty} C d\tau}$$

Nämnaren är ytan under avklingningskurvan och täljaren kallas avklingningskurvas moment som beräknas på ett liknande sätt som ytan. Ekvationen kan förenklas till:

$$\langle \bar{\tau} \rangle = \frac{\text{moment}}{\text{yta}} = \frac{\sum \tau_i \cdot C_i \cdot \Delta\tau}{\sum C_i \cdot \Delta\tau}$$

Momentet delas, precis som ytan, upp i en uppmätt del och en resterande del för att sedan summeras. På samma sätt som tidigare måste den första och sista delytan, A_0 och A_M , justeras. Det beräknade momentet med beteckningar enligt Figur 13:

$$\text{Beräknat moment} = \Delta\tau \cdot \sum_{i=1}^{M-1} (\tau_i \cdot C_i) + \frac{1}{8} \cdot \Delta\tau^2 \cdot C_0 + \frac{1}{2} \cdot \Delta\tau \cdot \tau_M \cdot C_M$$

Vid beräkning av det resterande momentet används återigen lutningskonstanten λ_{exp} :

$$\text{Resterande moment} = \frac{C_M}{\lambda_{exp}} \cdot \left(\tau_M + \frac{1}{\lambda_{exp}} \right)$$

Det beräknade och det resterande momentet summeras och kan nu användas för att beräkna rumsluftens medelålder $\langle \bar{\tau} \rangle$ som i sin tur används för att beräkna luftutbytestiden $\bar{\tau}_r$. Om det finns fler än ett frånluftsdon måste $\langle \bar{\tau} \rangle$ beräknas för varje frånluftsdon och sedan viktas med flödet genom respektive don.

Den i teorin kortast möjliga luftutbytestiden är lika med den nominella tidskonstanten, τ_n . Vid en ideal kolvströmning kan luftutbytestiden bli lika med den nominella tidskonstanten men detta är i praktiken omöjligt. Med andra ord tar det därför längre tid att byta ut luften. När det aktuella rummets volym, V , och det aktuella flödet, q_v , är kända kan den nominella tidskonstanten, anges i s , beräknas.

$$\tau_n = \frac{V}{q_v}$$

Luftutbyteseffektiviteten, ε_a , definieras som kvoten mellan den nominella tidskonstanten och luftutbytestiden.

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r}$$

Med andra ord är alltså luftutbyteseffektiviteten vid den ideala kolvströmningen 100 procent och vid fullständig omblandning 50 procent.

Det lokala indexet beräknas som förhållandet mellan den nominella tidskonstanten och luftens lokala medelålder (Mentor Graphics, 2011).

$$\text{Lokalt index} = \frac{\tau_n}{\langle \bar{\tau} \rangle_p}$$

5.1.3 Lufttemperaturer och luftfarter

För att mäta luftfarter och lufttemperaturer i olika punkter placeras sensorer på stativ runt om i lägenheten, tre sensorer i höjderna 0,1, 1,1 och 2,0 meter över golvnivå på varje stativ. Sensor och stativ visas i Figur 14.

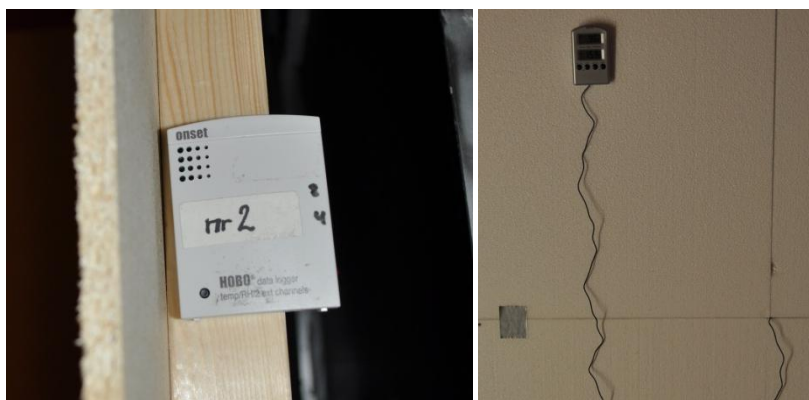


Figur 14 - Stativ med sensorer som registrerar lufttemperatur och luftfartighet.

5.1.4 Spalttemperatur

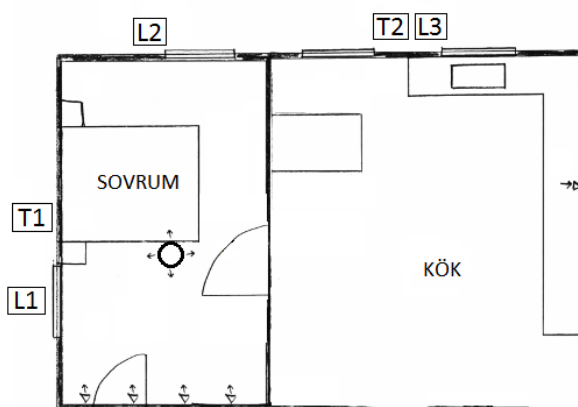
För att kontrollera temperaturen i spalten har både tre loggrar samt två vanliga termometrar placerats i spalten. Termometrarna läser även av inomhustemperaturen. På detta vis kan spalttemperaturen kontrolleras både momentant med termometrarna och kontinuerligt under en lång tid med loggrarna. Loggern och termometern visas i Figur 15.

Luftvärme i lågenergihus



Figur 15 - Till vänster en logger och till höger en termometer.

Placeringen av loggrar och termometrar framgår av Figur 16.



Figur 16 - Placering av loggrar (L1-L3) och termometrar (T1, T2).

Genom att känna till spalttemperaturen över en lång tid kan eventuella avvikande resultat från mätningarna förklaras. I Tabell 15 nedan framgår det när varje mätfall startades.

Tabell 15 - Mätfallens starttider. Observera att fallen ej mättes i nummerföljd.

Mät

1	12.00, 24/4 2012
2	14.00, 24/4 2012
3	16.30, 24/4 2012
4	07.00, 25/4 2012
8	12.45, 25/4 2012
7	16.00 25/4 2012
5	08.15, 26/4 2012
6	10.05, 26/4 2012
9	13.00, 26/4 2012
11	15.30, 26/4 2012
10	08.10, 27/4 2012

5.1.5 Felkällor

En felkälla under mätningarna är ofrivillig variation av till- och frånluftsflöde. Flödena styrs genom att justera hastigheten på fläktarna och kontrolleras genom att mäta trycket i kanalerna. De relativt låga flödena gör att trycket i kanalerna får svårt att stabilisera sig vilket kan leda till varierande flöden, uppemot 5 l/s. Vindförhållandena utanför laboratoriet torde också påverka flödena.

5.2 Simulering

Syftet med simuleringarna av den lilla modellen är att kunna validera denna efter jämförelse med mätresultaten. Därefter kan resultaten från simuleringarna av den stora datormodellen anses mer säkra.

5.2.1 Simuleringsfall

Simuleringsfallen för den lilla modellen är desamma som för mätlägenheten. Endast väggdon simuleras i den stora modellen. Anledningen till detta är att normalt byggs bostäder med väggplacerade tilluftsdon medan takdon är ovanligare. Simuleringsfall för den stora modellen redovisas i Tabell 16 nedan.

Tabell 16 - Simuleringsfallen för den stora datormodellen.

Simulering	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dontyp	V	V	V	V	V	V	V	V	V
Tillufttemperatur/ °C	31	31	31	42	42	42	18	18	18
Tilluftflöde/ (l/s)	65	65	65	30	30	30	30	30	30
Överluft	Öp	U	Öv	Öp	U	Öv	Öp	U	Öv

Förklaring: V-väggdon, T-takdon, U-under dörr, Öv-över dörr, Öp-Öppen dörr

5.2.2 Programvara

Simuleringar genomförs i CFD-programmet FloVENT® version 9.2 från Mentor Graphics. FloVENT® är ett datorprogram som beräknar luftflöden i 3D, värmeöverföring, distribution av föroreningar, parametrar som kan indikera komfortproblem i och runt byggnader av olika typer och slag. Programmet är framtaget för ingenjörer inom installationsteknik/HVAC-system (Mentor Graphics, 2012).

CFD står för Computational Fluid Dynamics, eller beräkningsbar strömningsdynamik som är en gren inom strömningsläran. CFD innebär en numerisk lösning på strömningsproblem. CFD baseras på tre fundamentala principer; (1) massa är bevarad, (2) Newtons andra lag $F = ma$, (3) energi är bevarad. Dessa principer uttrycker sig i matematiska ekvationer, oftast partiella differentialekvationer (Anderson, 2009). FloVENT® tillämpar dessa principer i form av finita volymmetoden. Stora krav på framförallt datorns processorkraft och internminne ställs.

5.2.3 Felkällor

Förutom typiska problem med CFD-simuleringar är en felkälla att det inte finns något ofrivilligt läckageflöde. Allt flöde sker genom de simulerade donen. Det är även okänt på vilket sätt programmet beräknar olika parametrar vilket kan leda till missvisande resultat.

6 Resultat och analys

I detta kapitel presenteras och analyseras resultat från mätningar och simuleringar.

6.1 Mätningar

6.1.1 Inledande kontrollmätningar

För att säkerställa godtagbara mätresultat bör åtminstone tre mätningar göras av varje fall. På grund av tidsbrist i det här arbetet har dock endast kontrollmätningar gjorts på det första fallet (Fall 1a, 1b och 1c). Mellan kontrollmätningarna jämförs lufttemperaturer, luftfarter, luftens lokala medelålder, lokalt index samt luftutbyteseffektivitet. Resultatet presenteras i Tabell 17 och Tabell 18 nedan. Endast jämförelse mellan resultaten görs i detta avsnitt. Analys och bedömning sker i senare avsnitt.

Tabell 17 - Temperaturer och farter i de tre kontrollmätningarna.

Mät Punkt	Lufttemperatur/ °C			Luftfart/ (m/s)		
	1A	1B	1C	1A	1B	1C
A 0.1	22,5	22,5	23	0,050	0,050	0,050
A 1.1	23	23,5	23,5	0,050	0,050	0,050
A 2.0	23,5	23,5	23,5	0,150	0,142	0,142
B 0.1	23,5	24	24	0,200	0,200	0,183
B 1.1	24,5	24,5	25	0,100	0,108	0,100
B 2.0	24	24	24,5	0,150	0,133	0,142
C 0.1	22	22	22,5	0,092	0,092	0,075
C 1.1	23,5	23,5	24	0,100	0,083	0,058
C 2.0	23,5	24	24	0,192	0,200	0,200
D 0.1	21	21	21,5	0,425	0,425	0,433
D 1.1	21	20,5	20,5	0,050	0,050	0,042
D 2.0	21	21	21	0,050	0,050	0,050
E 0.1	19	18,5	18,5	0,050	0,050	0,050
E 1.1	20,5	20,5	20,5	0,050	0,050	0,050
E 2.0	20,5	20,5	20,5	0,042	0,025	0,025

Tabell 18 - Lokal medelålder, lokalt index och luftutbyteseffektivitet i de tre kontrollmätningarna.

Mät Punkt	Lokal medelålder/ s			Lokalt index/ %			Luftutbyteseff./ %		
	1A	1B	1C	1A	1B	1C	1A	1B	1C
A 1.1	1374	1598	1370	162,8	132,7	164,4	-	-	-
B 1.1	1362	1487	1382	168,0	145,2	168,2	-	-	-
C 1.1	1422	1349	1308	162,5	166,1	179,4	-	-	-
D 1.1	2009	2092	2245	110,9	103,7	103,9	-	-	-
E 1.1	1989	2052	2451	112,4	106,4	95,8	-	-	-
F	1966	2035	2385	-	-	-	65,9	66	68

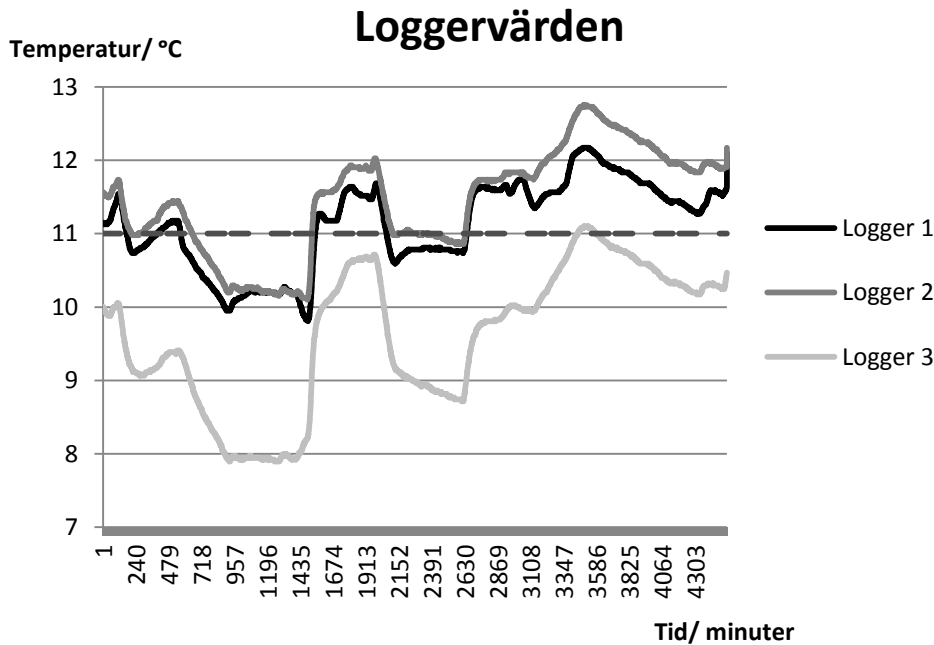
Det råder inga större skillnader mellan resultaten av de tre kontrollmätningarna. Därför bedöms att mätningarna stabila och övriga mätfall mäts enbart en gång. I vidare analyser

Luftvärme i lågenergihus

används resultaten från Fall 1c för att representera Fall 1 eftersom denna anses som den mest stabila av de tre kontrollmätningarna.

6.1.2 Spalttemperatur

Spalttemperaturen som har registrerats av loggrarna under hela mätperioden redovisas i Figur 17. Starttiden för loggrarna är 24 april 07:00.



Figur 17 - Plottade loggervärden under mättiden.

Spalttemperaturen för logger 1 och logger 2, som sitter på samma vägg, varierar mellan 9,8 och 12,8 °C och logger 3 varierar mellan 8 och 11 °C. Variationerna antas bero på varierande temperaturer inne i mätlägenheten och utanför mätlägenheten i laboratoriet och anses inte påverka resultaten nämnvärt. Vid beräkning av effektbehovet i lägenheten användes 11 °C som spalttemperatur.

6.1.3 Lufttemperaturer

I Tabell 19 nedan presenteras lufttemperaturerna i varje punkt under mätningarna.

Tabell 19 – Lufttemperaturer i °C i samtliga mätpunkter för alla fallen.

Mät	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A 0.1	22,5	22,5	22	20	22,5	21	21	20	21	21	21
A 1.1	23,5	23,5	23,5	20	24	21,5	22,5	20,5	21	22	21
A 2.0	23,5	23,5	24,5	20	26	24	25,5	21	24	22,5	23,5
B 0.1	24	24	22	20	22,5	21	21	20	20,5	21	20,5
B 1.1	24,5	24,5	24	20,5	24,5	22,5	23	21	22	23,5	22
B 2.0	24	24	25,5	20	26,5	24	26	20,5	24	23	25
C 0.1	22	22,5	22	20	22,5	20,5	21	20	21,5	20	20
C 1.1	23,5	24	24,5	20	24,5	22	23	20	22	22	21
C 2.0	24	24	25	20	26,5	25	25,5	20	25	22,5	24
D 0.1	21	19,5	19,5	21	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20
D 1.1	20,5	20,5	20,5	22,5	21	21,5	21,5	23	21,5	21,5	21
D 2.0	21	21	21	22,5	20,5	22,5	22	23	22,5	22	22
E 0.1	18,5	19	18,5	20,5	18,5	19,5	19,5	21	19,5	19,5	19
E 1.1	20,5	20	20	22	20	21	21	22,5	21	21	20,5
E 2.0	20,5	21	20,5	22	20	22	21,5	23	22	21,5	21,5

Den vertikala lufttemperaturgradienten som är en viktig faktor för det termiska klimatet presenteras för höjdiintervallen 2,0 – 0,1 m (stående person) och 1,1 – 0,1 m (sittande person) i Tabell 20 och Tabell 21 nedan.

Tabell 20 - Vertikal lufttemperaturgradient i °C 2,0-0.1 m.

Mät	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	1	1	2,5	0	3,5	3	4,5	1	3	1,5	2,5
B	0	0	3,5	0	4	3	5	0,5	3,5	2	4,5
C	2	1,5	3	0	4	4,5	4,5	0	3,5	2,5	4
D	0	1,5	1,5	1,5	0	2	1,5	2,5	2	1,5	2
E	2	2	2	1,5	1,5	2,5	2	2	2,5	2	2,5

Tabell 21 - Vertikal lufttemperaturgradient i °C 1,1-0,1 m.

Mät	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	1	1	1,5	0	1,5	0,5	1,5	0,5	0	1	0
B	0,5	0,5	2	0,5	2	1,5	2	1	1,5	2,5	1,5
C	1,5	1,5	2,5	0	2	1,5	2	0	0,5	2	1
D	-0,5	1	1	1,5	0,5	1	1	2,5	1	1	1
E	2	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Det kan även vara intressant att studera temperaturdifferenser i horisontalled för varje rum och hela lägenheten. I Tabell 22 nedan presenteras den horisontella

Luftvärme i lågenergihus

lufttemperaturdifferensen för varje rum respektive maximal differens i hela lägenheten på höjden 1,1 meter.

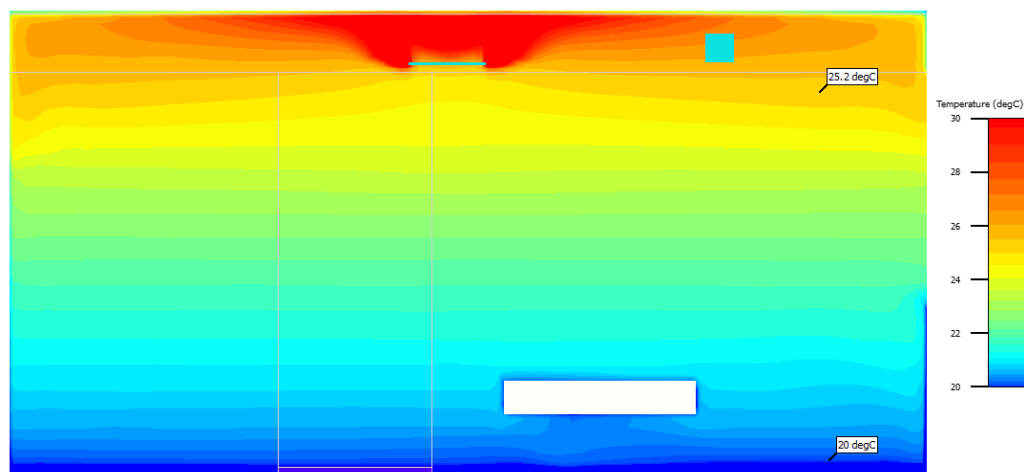
Tabell 22 - Horisontella lufttemperaturdifferenser i °C mellan max- och minvärden inom rummen respektive hela lägenheten.

Mätfall	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sov	1	1	1	0,5	0,5	1	0,5	1	1	1,5	1
Kök	0	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Lgh	4	4,5	4,5	2,5	4,5	1,5	2	3	1	2,5	1,5

Generellt noteras en högre temperatur i sovrummet och en lägre i köket. Dock i fallen 4 och 8 (fallen med hög intern värmelast och undertempererad tilluft) råder ett omvänt förhållande. Att det är varmare i sovrummet beror troligtvis på att det är där den varma tilluften tillförs. Att det blir kallare i sovrummet i fall 4 och 8 beror antagligen på samma orsak, med skillnaden att det är kall luft som tillförs i sovrummet.

Fall 3, 5, 7, 9 och 11 tenderar att ge fler övertemperaturer (över 24 °C) högt vid tak i punkt A, B och C. Även på nivå 1,1 meter över golvet i punkt B och C blir det för varmt i fall 1, 2, 3 och 5. Vad gäller undertemperaturer (under 20 °C) är utfallen mer spridda mellan fallen. I punkt D understiger lufttemperaturen 20 °C i fall 2 och 3. I punkt E understigs 20 °C i samtliga fall förutom fall 8.

Rekommendationen på maximalt 3 °C vertikal temperaturdifferens för stående människor överskrids i fall 3, 5, 6, 7, 9 och 11, där fall 7 är värst där differensen är mer än 3 °C i tre av fem mätskikt. Även i simuleringen som motsvarar mätfall 7 blir det en tydlig vertikal skiktning av lufttemperaturen, se Figur 18. Oftast överskrids rekommendationen i mätpunkterna B och C. För sittande personer kan ingen överskridelse av rekommendationen iakttas.



Figur 18 - Vertikal temperaturskiktning i sovrummet i simulering 7.

Luftvärme i lågenergihus

Vad gäller den horisontella temperaturdifferensen ser temperaturfördelningen bra ut inom respektive rum. Dock i fall 2, 3 och 5 är skillnaden i hela lägenheten upp mot 4,5 °C vilket kan anses som en något för stor skillnad eftersom rekommendationen är 3 °C och kravet är 5 °C.

6.1.4 Luftfarter

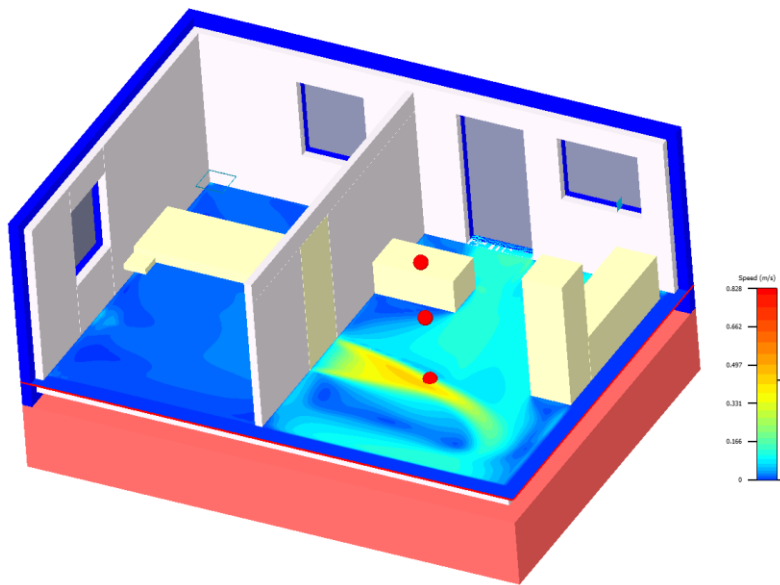
I Tabell 23 nedan presenteras luftfarterna i varje punkt under mätningarna.

Tabell 23 – Luftfarter i m/s i varje mätpunkt för alla fallen. Punkter som överskrider rekommendationen är fetmarkerade.

Mät	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A 0.1	0,050	0,063	0,050	0,100	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
A 1.1	0,050	0,075	0,050	0,092	0,050	0,050	0,050	0,000	0,050	0,088	0,050
A 2.0	0,144	0,175	0,050	0,108	0,088	0,067	0,100	0,050	0,050	0,175	0,063
B 0.1	0,194	0,163	0,050	0,233	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,063	0,050
B 1.1	0,103	0,088	0,040	0,108	0,025	0,050	0,025	0,025	0,050	0,113	0,050
B 2.0	0,142	0,113	0,100	0,233	0,031	0,050	0,092	0,025	0,050	0,138	0,063
C 0.1	0,086	0,050	0,050	0,175	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,200	0,063
C 1.1	0,081	0,050	0,050	0,150	0,050	0,050	0,050	0,058	0,050	0,063	0,050
C 2.0	0,197	0,225	0,200	0,125	0,131	0,158	0,075	0,092	0,225	0,225	0,238
D 0.1	0,428	0,050	0,115	0,050	0,475	0,050	0,158	0,158	0,050	0,050	0,050
D 1.1	0,047	0,050	0,070	0,050	0,044	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
D 2.0	0,050	0,088	0,055	0,058	0,050	0,067	0,050	0,050	0,050	0,100	0,050
E 0.1	0,050	0,025	0,045	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
E 1.1	0,050	0,050	0,045	0,058	0,050	0,050	0,050	0,058	0,050	0,050	0,050
E 2.0	0,031	0,063	0,020	0,017	0,025	0,050	0,025	0,000	0,050	0,025	0,038

På några punkter överstiger luftfarten den rekommenderade. I punkt C 2.0 överskrids 0,15 m/s i 7 av 11 fall. I punkt B 0.1 överskrids 0,15 m/s i fall 1, 2 och 4. Inga direkta samband med tilluftens temperatur och flöde eller typ av don kan dras. Dock kan en generellt högre luftfart iaktas vid punkt D 0.1, som är placerad i köket mitt framför sovrumsdörren, vid fallen 1, 5, 7 och 8. I samtliga av dessa fall går överluften under sovrumsdörren. I fall 1 och 5, som visar de högsta luftfarterna, är det dessutom ett högre flöde (30 l/s). Detta indikerar att problem med drag i vistelsezonens nedre del kan uppstå när överluften förläggs under en dörr på detta vis vid högre flöden. För att få en bild av hur luftrörelserna kan se ut runt punkt D 0.1 visas Figur 19 från motsvarande simulering av mätfall 5.

Luftvärme i lågenergihus



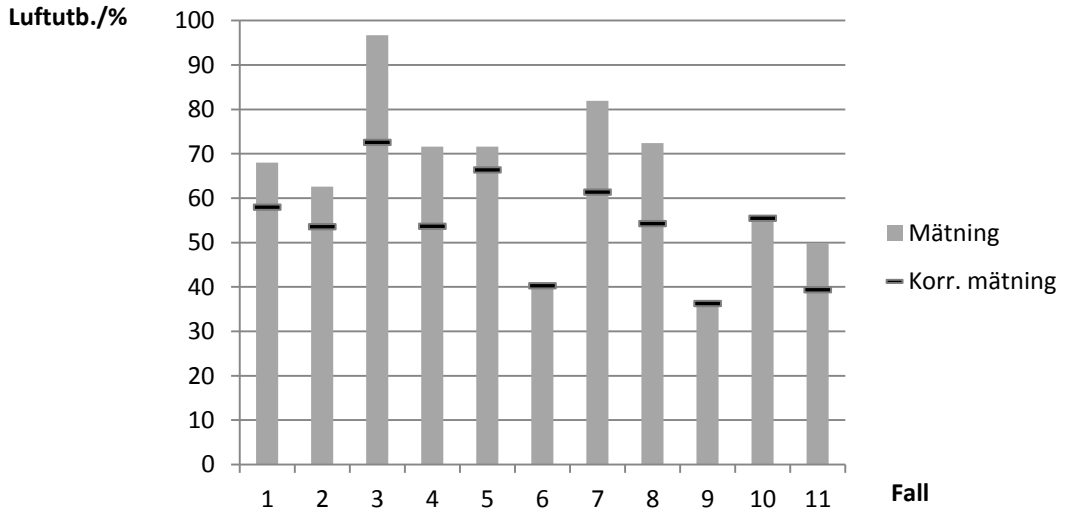
Figur 19 - Simulering av mätfall 5. En högre luftfart kan iakttagas framför sovrumsdörren i köket på höjden 0,1 m.

Inga högre farter har uppmäts i D 2.0 då överluften är förlagd över sovrumsdörren, men det kan bero på att mätpunkten inte är lokaliserad på rätt ställe för att mäta detta eller att spalten befinner sig en bit ifrån taket.

6.1.5 Spårgasmätningar

Från spårgasmätningarna beräknas luftutbyteseffektivitet och lokalt index. Resultatet från beräkningarna av luftutbyteseffektiviteterna presenteras i Figur 20 och i Tabell 24 nedan. I Figur 20 visas även korrigerade värden för mätningarna. Mätvärdena har korrigerats eftersom luftflödena har varierat under mätningarna, upp till 5 l/s. Avklingningskurvorna från mätningarna visas i Bilaga B.

Luftvärme i lågenergihus

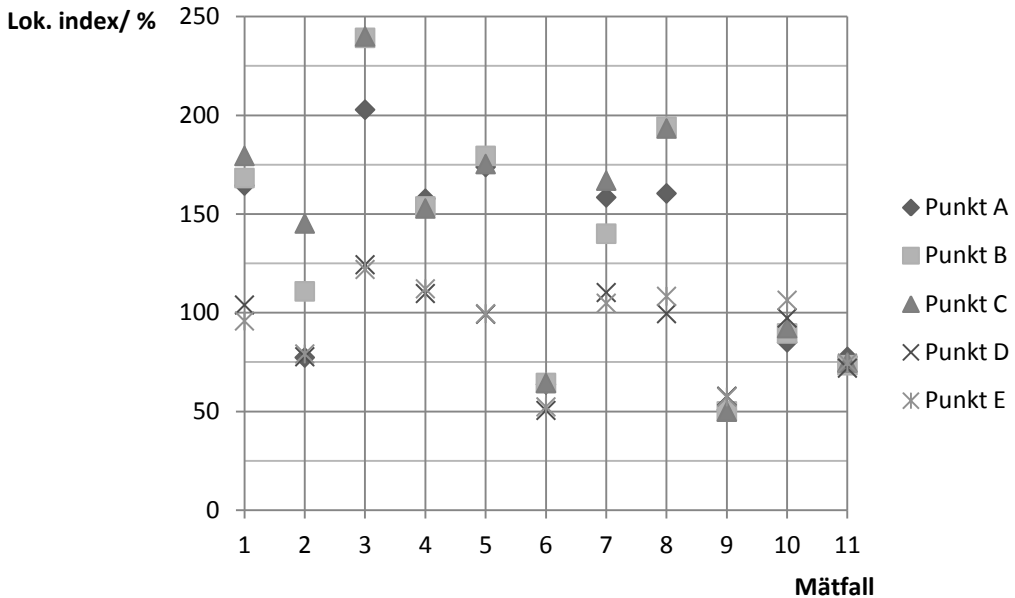


Figur 20 - Den uppmätta och den korrigerade uppmätta luftutbyteseffektiviteten för de olika mätfallen.

Tabell 24 - Den beräknade luftutbyteseffektiviteten i siffror.

Mätfall	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
L.eff./ %	68,0	62,6	96,7	71,6	71,6	40,3	81,9	72,4	36,3	55,5	49,9

Resultatet av beräkningarna av det lokala indexet presenteras i Figur 21 nedan.

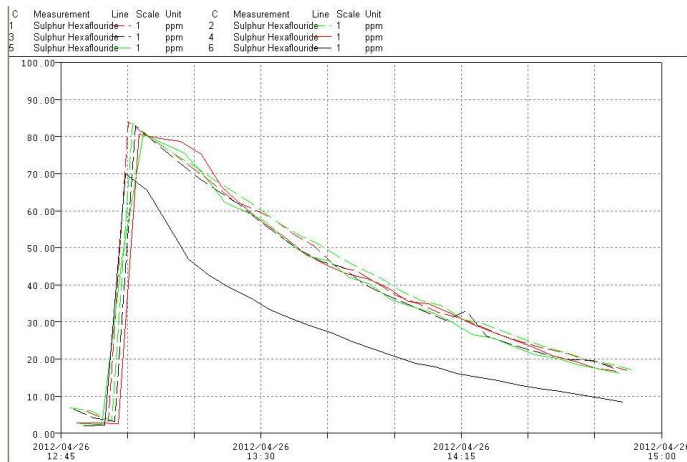


Figur 21 - Lokalt index.

Luftvärme i lågenergihus

Rekommendationen på en luftutbyteseffektivitet på minst 40 procent uppfylls i alla fallen förutom fall 9. Även fall 6 ligger lågt. Fall 3 visar väldigt höga värden, både på luftutbyteseffektivitet och lokala index. Framförallt det höga värdet på luftutbyteseffektiviteten anses orimligt högt. Troligtvis har något inträffat under mätningen som föranlett en högre omsättning av rumsluften, antagligen förhöjda flöden. Om ett större flöde hade passerat genom den kylda spalten hade detta lett till förhöjda temperaturer i den samma, något som inte kan ses i den loggade spalttemperaturen. En trolig orsak till de höga värdena på luftutbyteseffektiviteten kan vara att ett förhållandevis högt ventilationsflöde har använts i mätlägenheten. Omsättningen har varit cirka 0,7 och 1,4 omsättningar per timme för det låga respektive det höga flödet jämfört med den konventionella omsättningen 0,5 omsättningar per timme. Samma sak kan sägas om värdena för de lokala indexen.

De fall där de lokala indexen tydligt understiger rekommendationen 100 procent är fall 2, 6, 9 och 11. En kortslutning kan förväntas i dessa fall. Studeras avklingningskurvorna för mätpunkterna i fall 9 ses tydligt att koncentrationen i frånluften, heldragen svart, är mycket lägre än den i övriga mätpunkter, se Figur 22 nedan, vilket visar på kortslutning.



Figur 22 - Avklingningskurva för mätfall 9

Gemensamt för dessa fall är att överluften kan passera mellan sovrums och kök nära taket. I fall 2 och 6 är överluften förlagd över sovrumsdörren och i fall 9 och 11 är den förlagd genom öppen dörr. Det är troligtvis anledning till kortslutningen. Även fall 10 har överluften genom öppen dörr, men detta fall visar inte samma tydliga tendenser till kortslutning, troligtvis beror detta på att det höga ventilationsflödet skapar en bra ombländning vilket motverkar kortslutning.

6.1.6 Jämförelse mellan variabler

I detta avsnitt jämförs resultat mellan olika fall i syfte att utvärdera de olika variabelernas påverkan av inomhusklimatet. Diagram med de olika jämförelserna finns i Bilaga C.

Vid bedömningen av överluften jämfördes fallen med samma flöde/temperatur och don. Vad gäller den vertikala temperaturdifferensen för stående personer kan inget direkt samband med hur överluften går iaktas.

Vad gäller luftfarterna kan det konstateras att en överhängande risk för drag i vistelsezonens underkant i köket framför sovrumsdörren finns när överluften går under dörren. När överluften går över dörren och när dörren är helt öppen tenderar luftfarten i sovrummet framför dörren att bli något högre, dock inom rimliga gränser. I övrigt råder ingen större skillnad mellan de olika sätten överluften går.

Luftutbyteseffektiviteten tenderar att bli högre när överluften går under dörr. Sämst resultat avseende luftutbyteseffektivitet fås när överluften går genom öppen dörr. När överluften går under dörr ges även ett generellt högre lokalt index, framförallt i sovrummet. När överluften går över dörren eller genom öppen dörr riskeras att rekommendationen på minst 90 % lokalt index underskrids.

Vid bedömningen av flöde/temperatur jämfördes fallen med samma överluftsgång och don. Vid jämförelse mellan ett högt flöde med en lägre temperatur (30/34) och ett lägre flöde med en högre temperatur (15/45) ger det förra alternativet en mindre vertikal temperaturdifferens.

Med undantag från uppmätt luftfart i mätpunkt D 0.1 kan ingen generell skillnad iaktas mellan fallen med högt flöde/lägre temperatur (30/34) och lågt flöde/högre temperatur (15/45) när överluften går under dörren. Risken för drag är tillsyns något högre när undertempererad tilluft tillförs.

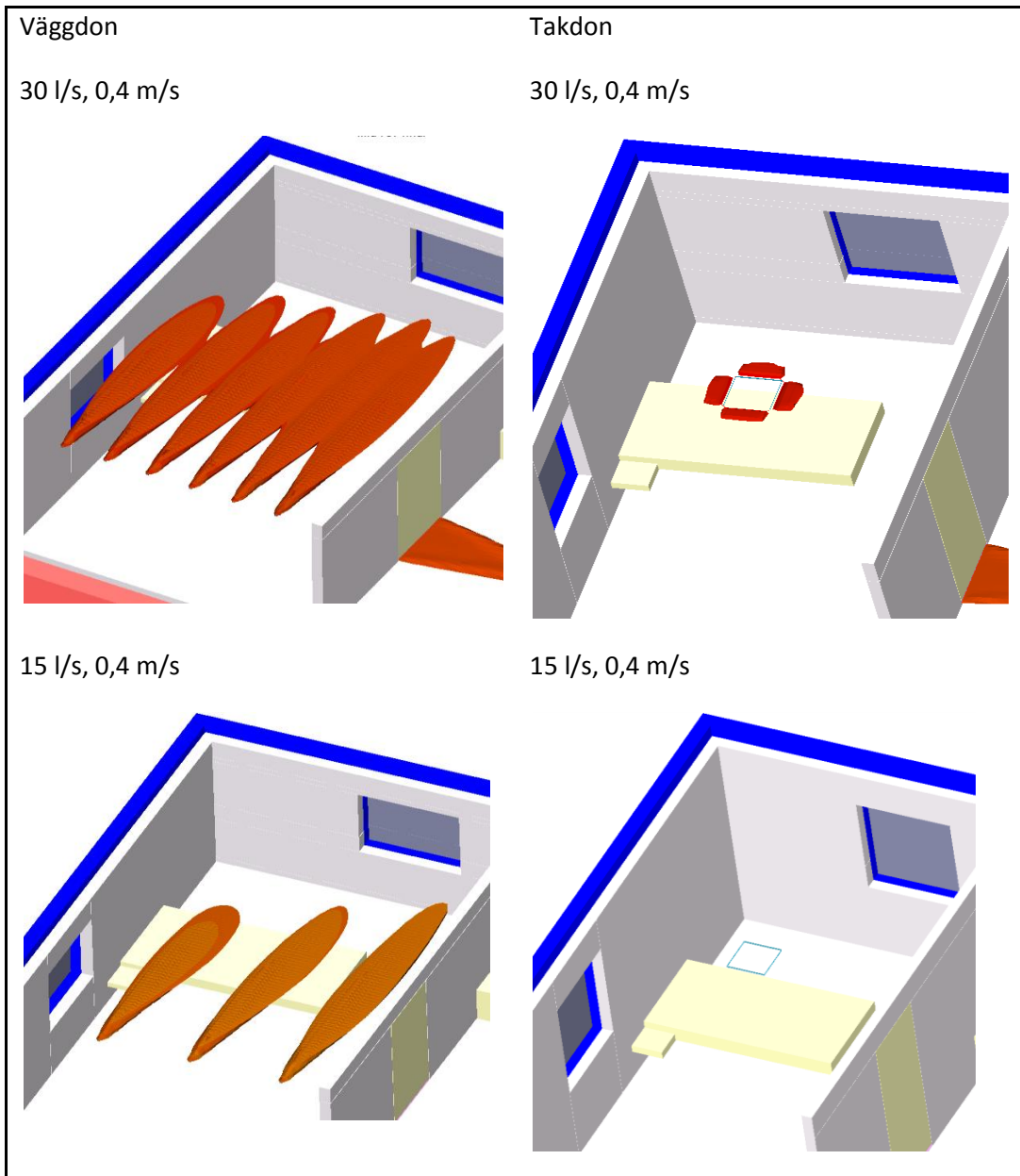
Vad gäller det lokala indexet ger det låga flödet med hög temperatur (15/45) generellt högre värden när väggdonet används och överluften går under dörren. Vid användning av takdonet är resultaten mer lika.

När överluftens sätt att gå mellan rummen varierar iaktas en större vertikal temperaturdifferens då takdonet används. Takdonet ger även generellt lägre farter. Luftutbyteseffektiviteten och de lokala indexen är generellt lägre när överluften går under dörr och takdon används.

När flöde/temperatur varierar blir den vertikala temperaturdifferensen i sovrummet större då takdonet används. Takdonet ger generellt lägre luftfarter. Det är endast små skillnader i luftutbyteseffektivitet mellan donen då flöde/temperatur varierar, dock ger takdonet något lägre lokala index i sovrummet.

Luftvärme i lågenergihus

Vilket don som är mest lämpligt i mätlägenheten avseende kastlängd kan avgöras genom att studera kastlängder för de två donen i simuleringarna. Normalt anges kastlängder för isovelnen 0,2 m/s. Dock vid mätningar mäts isovelens längd för 0,4 m/s för att sedan dubbleras för att ge säkrare resultat. I Figur 23 nedan visas kastbilder för de två donen.



Figur 23 - Isoveler för tilluftsdonen

Figurerna indikerar att det erhålls mer lämpliga kastlängder när väggdonen används.

6.2 Jämförelse mellan simulering och mätning

Datormodellen valideras genom att jämföra lufttemperaturer, luftfarter, lokalt index samt luftutbyteseffektivitet i de gemensamma kontrollpunkterna från simuleringarna av den lilla modellen och mätningarna. Diagram för jämförelse mellan mätning och simulering avseende lufttemperatur, luftfart och lokalt index återfinns i Bilaga D.

6.2.1 Jämförelse av lufttemperaturer

Genom att anta att uppmätta värden är sanna kan ett relativt fel beräknas för alla mätpunkter genom att beräkna förhållandet mellan det absoluta felet (simuleringsvärde - mätvärde) och det sanna värdet (mätvärdet). Det genomsnittliga felet avseende lufttemperatur för alla fallen är 4,3 %.

Överensstämmelsen mellan resultaten från mätning och simulering avseende lufttemperaturer är tillsynes hög. Detta kan ses som en indikation på att datormodellen ger verklighetstroga resultat. Temperaturen tenderar att ligga strax över det uppmätta värdet.

6.2.2 Jämförelse av luftfarter

På samma sätt som med lufttemperaturerna kan det relativa felet beräknas. Det genomsnittliga felet med avseende på luftfarter i alla fallen är 59,7 %.

Större skillnader mellan mätningar och simuleringar avseende lufthastigheter kan tänkas bero på att vissa kontrollpunkters placering avviker något mellan mätmodell och datormodell. Störst fel kan noteras i mätpunkterna C 2.0 och D 0.1. Detta kan förklaras med att överluften går över och under sovrumsdörren vilket föranleder skiftande lufrörelser i just detta område. Detta gör så att det blir större lufrörelser i närheten av just mätpunkt C 2.0 och D 0.1. I övrigt kan en tendens till något lägre lufthastigheter i simuleringarna jämfört med mätningarna iaktas.

6.2.3 Jämförelse av luftutbyteseffektivitet

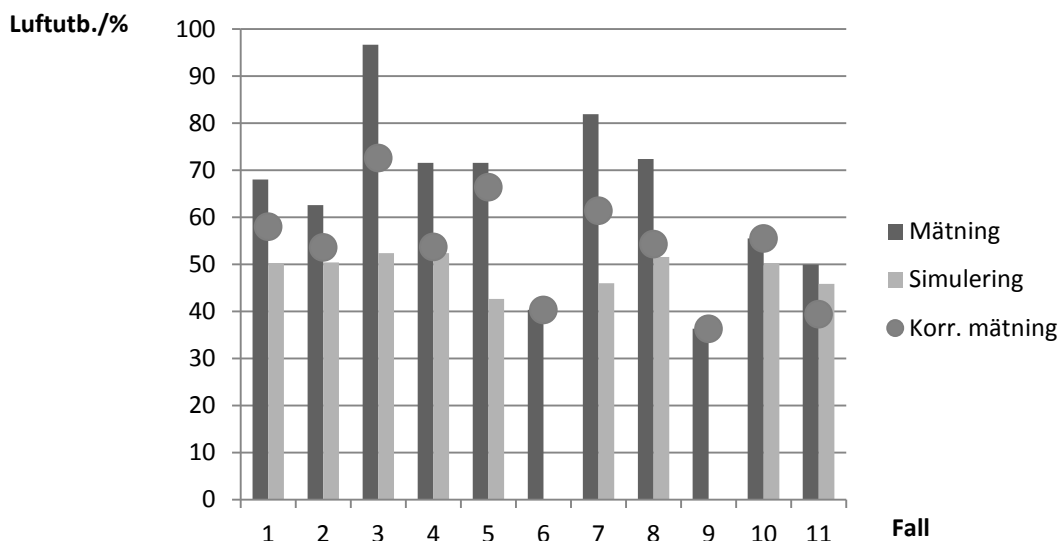
Luftutbyteseffektiviteten ges inte direkt ur FloVENT®. Däremot ges luftens lokala medelålder vilket betyder att luftutbyteseffektiviteten kan beräknas även för simuleringarna enligt teori i tidigare avsnitt. I Tabell 25 redovisas resultatet från beräkningarna av luftutbyteseffektiviteten i simuleringen av den lilla modellen.

Tabell 25 - Beräknad luftutbyteseffektivitet från simuleringarna av den lilla modellen. I fall 6 och 9 uppkom fel i programvaran och resultat kan ej visas.

Fall	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
L.eff./%	50,2	50,4	52,4	52,4	42,7	-	46,0	51,5	-	50,2	45,9

Luftvärme i lågenergihus

I Figur 24 jämförs de simulerade värdena med de uppmätta.



Figur 24 - Jämförelse uppmätt och simulerad luftutbyteseffektivitet.

Simuleringarna tycks ge mer rimliga värden på luftutbyteseffektiviteten, mellan 40 och 50 procent. Stora skillnader märks i alla fall förutom fall 10 och 11 där resultaten är tämligen lika. Simulering av fall 6 och 9 uppvisade fel vid beräkning av luftens lokala medelålder som ej kunde åtgärdas. Därför kan inga resultat för dessa fall visas.

6.2.4 Jämförelse av lokalt index

När jämförelse avseende lokalt index görs framgår en tydlig trend att simuleringarna ger högre värden än mätningarna i sovrummet, samtidigt som resultaten i köket är mer likvärdiga. Mätfall 5 och 7 avviker med högre värden på lokalt index i mätningarna i sovrummet.

En förklaring till resultaten kan vara att i mätningarna finns det otätheter som inte går att simulera. Detta leder till olika tryckförhållanden mellan sovrums och kök jämfört med simuleringarna. I simuleringarna går all luft från sovrummet till köket medan i mätningarna suges även luft från laboratoriet in i köket via otätheter.

6.2.4 Slutsats från jämförelser mellan simulering och mätning

Baserat på resultaten av jämförelsen anses datormodellen ge riktiga resultat med reservation för något för låga luftfarter. Utvidgning av den lilla modellen i form av den stora modellen anses medge trovärdiga resultat.

6.3 Simulering av lilla modellen

Då datormodellering och mätning anses ge liknande resultat kan ytterligare inneklimatparametrar som inte har tagits upp i jämförelserna tas fram ur simuleringens resultat och anses gälla både för simulering och mätning.

6.3.1 Operativ temperatur

Genom att beräkna medelvärdet av medelstrålningstemperatur och lufttemperatur som ges av FloVENT® erhålles den operativa temperaturen. Den beräknade operativa temperaturen från simuleringarna av den lilla modellen redovisas i Tabell 26 nedan.

Tabell 26 - Den beräknade operativa temperaturen i °C i alla mätpunkter från simuleringen av den lilla modellen.

Sim	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A 0.1	21,7	21,0	20,1	19,1	21,2	19,3	19,8	19,1	19,2	19,9	18,6
A 1.1	22,1	21,4	21,3	19,2	22,4	20,1	21,1	19,5	19,8	20,6	19,4
A 2.0	22,7	22,1	22,1	19,5	24,0	22,4	23,2	20,0	22,2	21,4	20,4
B 0.1	21,6	20,9	20,1	19,4	21,1	19,2	19,7	18,9	19,1	19,7	18,4
B 1.1	22,5	21,9	21,3	19,4	22,4	20,0	21,0	19,5	19,7	21,2	19,3
B 2.0	22,7	22,1	22,3	19,6	24,0	22,4	23,1	19,8	22,1	21,5	20,7
C 0.1	21,6	20,9	20,3	19,3	21,3	19,5	19,9	19,2	19,4	19,9	18,7
C 1.1	22,3	21,7	21,4	19,6	22,6	20,4	21,4	19,9	20,1	20,9	19,5
C 2.0	23,0	22,4	22,8	19,8	24,2	22,6	23,5	20,0	22,4	21,7	21,1
D 0.1	21,0	19,7	18,9	19,6	20,6	19,2	18,9	19,6	19,4	19,7	18,6
D 1.1	20,5	19,9	19,3	20,5	20,5	19,7	19,2	20,6	19,9	20,3	19,1
D 2.0	20,5	20,4	19,2	20,8	20,5	20,5	19,2	20,8	20,6	20,6	19,5
E 0.1	19,5	19,1	18,3	19,2	19,5	18,6	18,3	19,3	18,7	19,2	18,1
E 1.1	19,9	19,4	18,6	20,2	19,9	19,0	18,6	20,2	19,3	19,7	18,6
E 2.0	20,1	19,9	18,8	20,7	20,1	19,8	18,8	20,8	20,1	20,1	19,2

För att kunna studera den operativa temperaturen lättare visas medelvärden för den operativa temperaturen i de olika fallen i Tabell 27 nedan.

Tabell 27 - Medelvärden för den operativa temperaturen från simuleringarna av den lilla modellen.

Sim	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sov/ °C	22,2	21,6	21,3	19,4	22,6	20,7	21,4	19,5	20,5	20,7	19,6
Kök/ °C	20,3	19,7	18,9	20,2	20,2	19,5	18,8	20,2	19,7	19,9	18,9
LGH/ °C	21,5	20,9	20,3	19,7	21,6	20,2	20,4	19,8	20,1	20,4	19,3

Tidigare i rapporten har det nämnts att den operativa temperaturen bör ligga mellan 21-23 grader med ett optimalvärde på 22 grader (vinterfallet) för att kunna räknas till klimatklass TQ1. Högsta och lägsta värde i de olika fallen ligger mellan drygt 18 och 24 grader vilket skulle innebära klimatklass TQ2 eller TQ3. När medelvärdena studeras framgår det att den operativa temperaturen i sovrummet erhåller bra värden, mellan ca 20 och 22,5 grader, med undantag för de båda fallen med höga interna värmelaster, fall 4 och 8, samt fall 11, då den operativa temperaturen ligger mellan 19 och 20 grader. I köket noteras betydligt lägre temperaturer, mellan 18 och 20 grader. I köket sticker fall 3, 7 och 11 ut som fallen med lägst medelvärde. Generellt visar resultaten att den operativa temperaturen i köket är för låg i nästan samtliga fall och medger därför inte en bra termisk komfort. I fallen 9, 10 och 11,

Luftvärme i lågenergihus

där dörren mellan rummen är öppen är den operativa temperaturen för låg även i sovrummet.

6.3.2 PMV och PPD

I Tabell 28, Tabell 29 och Tabell 30 nedan redovisas PMV och PPD från simuleringarna av den lilla modellen.

Tabell 28 - PMV och PPD för simulering 1-4.

Sim	1		2		3		4	
Punkt	PMV	PPD	PMV	PPD	PMV	PPD	PMV	PPD
A 0.1	-0.6	12.6	-0.8	17.4	-1.0	26.6	-1.3	38.4
A 1.1	-0.5	10.7	-0.7	14.8	-0.7	15.4	-1.2	37.0
A 2.0	-0.5	10.0	-0.7	14.0	-0.6	13.2	-1.2	33.7
B 0.1	-0.6	12.8	-0.8	19.1	-1.0	26.9	-1.2	34.8
B 1.1	-0.4	8.2	-0.5	11.1	-0.7	15.1	-1.2	34.1
B 2.0	-0.3	7.4	-0.5	9.8	-0.5	10.3	-1.1	32.5
C 0.1	-0.6	13.3	-0.8	18.8	-1.0	24.4	-1.2	37.1
C 1.1	-0.4	9.1	-0.6	12.8	-0.7	14.3	-1.2	33.3
C 2.0	-0.3	6.8	-0.4	9.0	-0.3	7.1	-1.1	30.1
D 0.1	-1.3	39.2	-1.2	33.9	-1.3	42.4	-1.2	34.2
D 1.1	-0.9	23.3	-1.1	30.0	-1.4	45.3	-0.9	22.5
D 2.0	-0.9	23.0	-1.0	24.1	-1.2	37.4	-0.8	19.7
E 0.1	-1.3	37.5	-1.3	42.3	-1.5	51.6	-1.3	37.8
E 1.1	-1.1	28.7	-1.2	36.5	-1.4	45.0	-1.0	25.0
E 2.0	-1.0	27.1	-1.1	29.7	-1.3	42.2	-0.8	19.8

Luftvärme i lågenergihus

Tabell 29 - PMV och PPD för simulering 5-8.

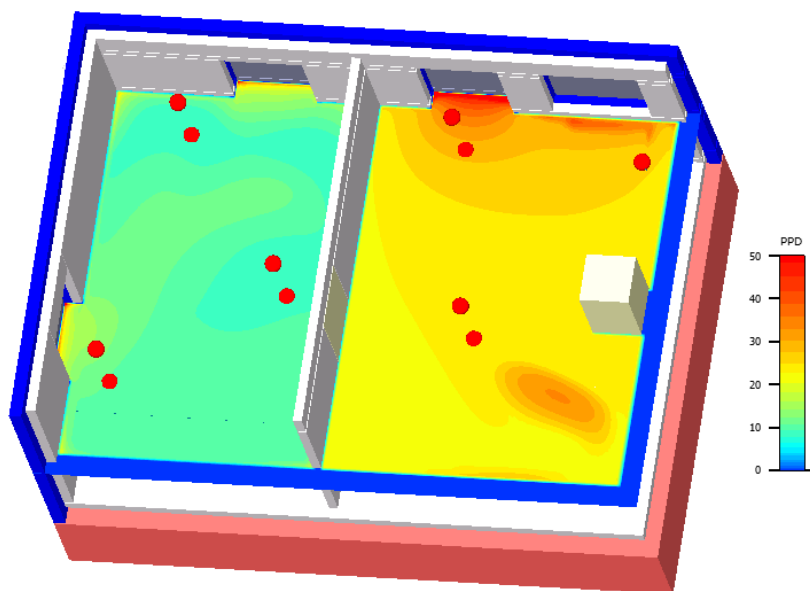
Sim	5		6		7		8	
Punkt	PMV	PPD	PMV	PPD	PMV	PPD	PMV	PPD
A 0.1	-0.7	16.6	-1.2	36.4	-1.1	31.1	-1.3	40.0
A 1.1	-0.4	8.6	-1.0	26.5	-0.7	17.0	-1.2	34.0
A 2.0	0.0	5.0	-0.4	8.5	-0.2	5.9	-1.1	28.3
B 0.1	-0.8	17.3	-1.3	37.9	-1.1	31.9	-1.3	41.4
B 1.1	-0.4	8.8	-1.0	27.4	-0.8	17.3	-1.2	34.4
B 2.0	0.0	5.0	-0.4	8.8	-0.3	6.3	-1.1	29.6
C 0.1	-0.7	15.3	-1.2	34.4	-1.1	29.1	-1.3	37.9
C 1.1	-0.4	7.7	-0.9	23.8	-0.7	15.0	-1.1	30.0
C 2.0	0.0	5.0	-0.4	7.9	-0.2	5.5	-1.0	26.8
D 0.1	-1.2	35.0	-1.3	37.8	-1.3	42.5	-1.3	41.2
D 1.1	-0.9	23.0	-1.1	32.2	-1.3	38.6	-0.9	22.1
D 2.0	-0.9	22.9	-0.9	23.0	-1.3	38.5	0.8	19.6
E 0.1	-1.2	37.4	-1.4	46.7	-1.5	51.7	-1.3	37.5
E 1.1	-1.1	28.5	-1.3	39.3	-1.4	45.2	-1.0	25.0
E 2.0	-1.0	26.9	-1.1	29.6	-1.4	42.7	-0.8	19.9

Tabell 30 - PMV och PPD för simulering 9-11.

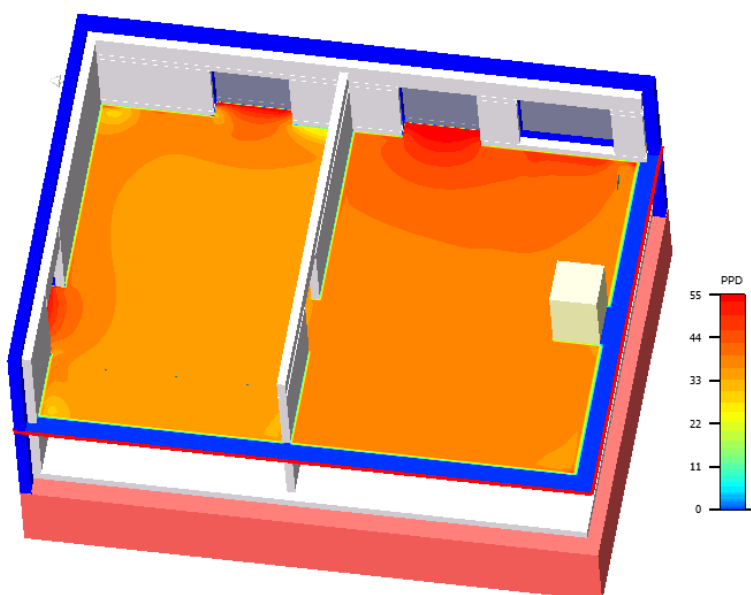
Sim	9		10		11	
Punkt	PMV	PPD	PMV	PPD	PMV	PPD
A 0.1	-1.3	37.7	-1.1	29.9	-1.4	46.2
A 1.1	-1.1	30.1	-0.9	22.0	-1.2	35.6
A 2.0	-0.5	9.5	-0.9	21.0	-1.1	28.8
B 0.1	-1.3	39.5	-1.1	31.2	-1.5	48.7
B 1.1	-1.1	31.2	-0.9	20.3	-1.2	36.6
B 2.0	-0.5	9.8	-0.7	14.1	-1.0	24.8
C 0.1	-1.2	35.6	-1.3	37.5	-1.4	45.3
C 1.1	-1.0	26.9	-0.8	19.3	-1.2	33.6
C 2.0	-0.4	8.8	-0.6	12.8	-0.7	16.5
D 0.1	-1.2	36.0	-1.1	32.0	-1.4	45.7
D 1.1	-1.1	29.1	-1.0	25.5	-1.3	38.1
D 2.0	-0.9	21.2	-0.9	21.9	-1.2	32.6
E 0.1	-1.4	44.3	-1.3	38.4	-1.6	53.4
E 1.1	-1.2	35.4	-1.1	30.6	-1.4	44.4
E 2.0	-1.0	26.5	-1.0	26.4	-1.2	37.2

Luftvärme i lågenergihus

Generellt råder det höga värden på PPD i alla fallen, mellan 20 och 40 %. I vissa fall blir PPD runt 10 % i somliga punkter. PMV visar negativa värden vilket visar att de flesta upplever det termiska klimatet svalare än önskvärt. Fall 1 visar de genomsnittligt bästa värdena medan fall 11, visar de generellt sämsta. Generellt är det svårt att godkänna den termiska komforten i något utav fallen. Fördelning av PPD-index på höjden 1,1 m visas i Figur 25 och Figur 26 nedan för fall 1 och 11.



Figur 25 - Fördelning av PPD på höjden 1,1 m i fall 1.



Figur 26 - Fördelning av PPD på höjden 1,1 m i fall 11.

6.4 Simulering av stora modellen

6.4.1 Lufttemperaturer

De simulerade lufttemperaturerna i alla punkter och fall redovisas i Tabell 31 nedan.

Tabell 31 – Lufttemperaturer i °C i alla punkter i den stora modellen.

Sim	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A 0.1	22.2	22.9	22.6	22.7	23.6	23.2	22.6	22.2	22.2
A 1.1	23.0	23.5	23.5	23.6	24.4	24.2	22.6	22.1	22.2
A 2.0	23.8	24.0	23.9	24.3	24.9	24.8	22.6	22.2	22.2
B 0.1	22.9	23.4	23.0	22.1	22.8	22.5	22.5	22.2	22.2
B 1.1	23.9	24.3	24.0	24.2	25.3	24.8	22.6	22.1	22.1
B 2.0	24.0	24.4	24.2	25.5	26.1	25.9	22.5	22.0	22.0
C 0.1	22.3	22.7	22.7	22.6	23.4	23.1	22.5	22.1	22.1
C 1.1	23.1	24.0	23.3	23.7	24.5	24.3	22.6	22.1	22.1
C 2.0	24.0	24.2	24.1	24.9	23.7	25.3	22.6	22.1	22.1
D 0.1	22.3	22.1	22.1	22.8	22.7	22.7	22.8	22.8	23.0
D 1.1	22.8	22.6	22.7	23.6	23.3	23.4	23.0	23.2	23.1
D 2.0	23.1	22.8	22.9	23.8	23.6	23.7	23.4	23.6	23.5
E 0.1	21.8	21.6	21.7	22.5	22.3	22.3	22.8	22.9	23.0
E 1.1	22.9	22.6	22.7	23.6	23.4	23.5	22.9	23.1	23.1
E 2.0	23.2	22.9	23.0	23.9	23.7	23.8	23.5	23.7	23.6
G 0.1	22.1	22.0	22.0	22.6	22.5	22.6	22.8	22.9	22.9
G 1.1	23.0	22.8	22.9	23.5	23.4	23.4	22.9	23.0	23.0
G 2.0	23.9	23.8	23.8	25.2	25.1	25.1	23.1	23.2	23.3
H 0.1	22.2	22.0	22.0	22.7	22.6	22.6	22.8	22.9	22.9
H 1.1	22.9	22.7	22.8	23.6	23.4	23.5	22.9	22.9	23.0
H 2.0	23.2	23.1	23.1	24.2	24.0	24.1	23.1	23.2	23.2
I 0.1	22.3	22.2	22.2	22.8	22.8	22.8	22.9	23.0	23.0
I 1.1	22.9	22.8	22.9	23.6	23.4	23.5	23.0	23.1	23.1
I 2.0	23.5	23.4	23.5	24.6	24.4	24.5	23.1	23.2	23.2

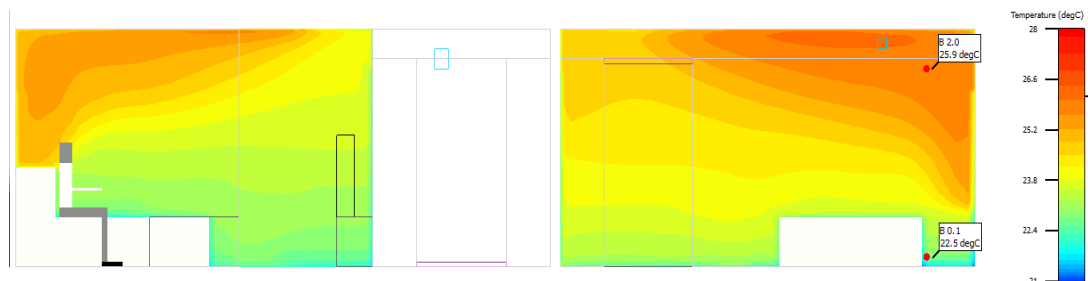
Fördelningen av lufttemperaturen mellan rummen i lägenheten visar inga stora temperaturdifferenser. Den vertikala temperaturdifferensen i de olika punkterna och fallen redovisas i Tabell 32 nedan.

Tabell 32 - Vertikal temperaturdifferens i °C, 2,0-0,1 m.

Sim	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	1.6	1.1	1.3	1.6	1.3	1.6	0.0	0.0	0.0
B	1.1	1.0	1.2	3.4	3.3	3.4	0.0	-0.2	-0.2
C	1.7	1.5	1.4	2.3	0.3	2.2	0.1	0.0	0.0
D	0.8	0.7	0.8	1.0	0.9	1.0	0.6	0.8	0.5
E	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	0.7	0.8	0.6
G	1.8	1.8	1.8	2.6	2.6	2.5	0.3	0.3	0.4
H	1.1	1.1	1.1	1.5	1.4	1.5	0.3	0.3	0.3
I	1.3	1.2	1.3	1.8	1.6	1.7	0.2	0.2	0.2

Luftvärme i lågenergihus

Den vertikala temperaturdifferensen 2.0-0.1 meter överskrider rekommendationen på maximalt 2,5 °C i simulering 4 och 5, för TQ1 i punkten G, kraven för TQ2 och TQ3 klaras. I punkt B överskrider rekommendationen för TQ2 och TQ3, 3 °C, i simulering 4, 5 och 6. I övriga simuleringar ligger den vertikala temperaturdifferensen inom rekommenderade värden. I Figur 27 nedan visas den vertikala temperaturfördelningen i vardags- och sovrum i simulering 6. Punkt B är belägen i bildens högra del och punkt G är belägen i bildens vänstra del.



Figur 27 - Vertikal temperaturfördelning i vardagsrum (till vänster) och sovrum (till höger) i simulering 6. Observera skalan.

6.4.2 Operativa temperaturer

I Tabell 33 nedan redovisas beräknade värden av den operativa temperaturen i den stora modellen. Medelstrålningstemperaturen, som beräkningen av den operativa temperaturen är baserad på redovisas i Bilaga E.

Luftvärme i lågenergihus

Tabell 33 - Beräknad operativ temperatur i °C i alla punkter i den stora modellen.

Sim	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A 0.1	21.8	22.4	22.1	22.4	23.0	22.7	22.8	22.5	22.5
A 1.1	22.3	22.6	22.6	22.8	23.4	23.3	22.7	22.4	22.4
A 2.0	23.0	23.2	23.1	23.6	24.1	24.0	22.7	22.4	22.4
B 0.1	22.2	22.8	22.2	21.7	22.2	22.0	22.7	22.4	22.4
B 1.1	22.7	23.2	22.9	23.2	23.9	23.6	22.7	22.3	22.3
B 2.0	22.9	23.3	23.1	24.1	24.6	24.4	22.6	22.3	22.3
C 0.1	22.1	22.4	22.4	22.4	23.0	22.8	22.7	22.4	22.4
C 1.1	22.6	23.2	22.8	23.1	23.7	23.5	22.7	22.4	22.4
C 2.0	23.3	23.5	23.4	24.0	23.6	24.3	22.7	22.4	22.4
D 0.1	21.9	21.9	21.9	22.6	22.5	22.5	22.9	22.9	23.0
D 1.1	22.3	22.2	22.3	23.0	22.9	22.9	23.0	23.1	23.1
D 2.0	22.4	22.4	22.4	23.2	23.1	23.1	23.3	23.4	23.3
E 0.1	21.6	21.4	21.5	22.2	22.0	22.1	22.9	23.0	23.0
E 1.1	22.0	21.8	21.9	22.7	22.3	22.6	23.1	23.2	23.3
E 2.0	22.3	22.2	22.2	23.0	22.7	22.9	23.5	23.6	23.5
G 0.1	21.8	21.9	21.8	22.4	22.3	22.4	22.9	22.9	22.9
G 1.1	22.6	22.6	22.6	23.2	23.1	23.1	23.0	23.0	23.0
G 2.0	23.2	23.2	23.2	24.3	24.2	24.2	23.1	23.1	23.2
H 0.1	21.9	21.9	21.9	22.5	22.5	22.5	22.9	22.9	22.9
H 1.1	22.4	22.4	22.4	23.1	23.0	23.1	22.9	22.9	23.0
H 2.0	22.8	22.8	22.8	23.7	23.6	23.7	23.1	23.1	23.1
I 0.1	22.0	22.0	22.0	22.6	22.6	22.6	22.9	23.0	23.0
I 1.1	22.5	22.4	22.5	23.1	23.0	23.1	23.0	23.0	23.1
I 2.0	22.8	22.8	22.8	23.7	23.6	23.7	23.1	23.1	23.1

Medelvärden för den operativa temperaturen redovisas i Tabell 34 nedan.

Tabell 34 - Medelvärden för den operativa temperaturen i °C i den stora modellen.

Sim	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sov	22.5	22.9	22.7	23.0	23.5	23.4	22.7	22.3	22.4
Kök	22.1	22.0	22.0	22.8	22.6	22.7	23.1	23.2	23.2
Vard	22.4	22.4	22.4	23.2	23.1	23.1	23.0	23.0	23.0
LGH	22.4	22.5	22.4	23.0	23.1	23.1	22.9	22.8	22.8

I sovrummet varierar den operativa temperaturen mellan 21,7 och 24,6 grader. I vardagsrummet varierar den operativa temperaturen mellan 21,8 och 24,4 grader, snarlikt med sovrummet. Köket ligger mellan 21,6 och 23,5 grader. Överlag är det en jämn fördelning av den operativa temperaturen i hela lägenheten. Medelvärdena ligger när det rekommenderade värdet enligt TQ1 på 20-23 grader.

6.4.3 Luftfarter

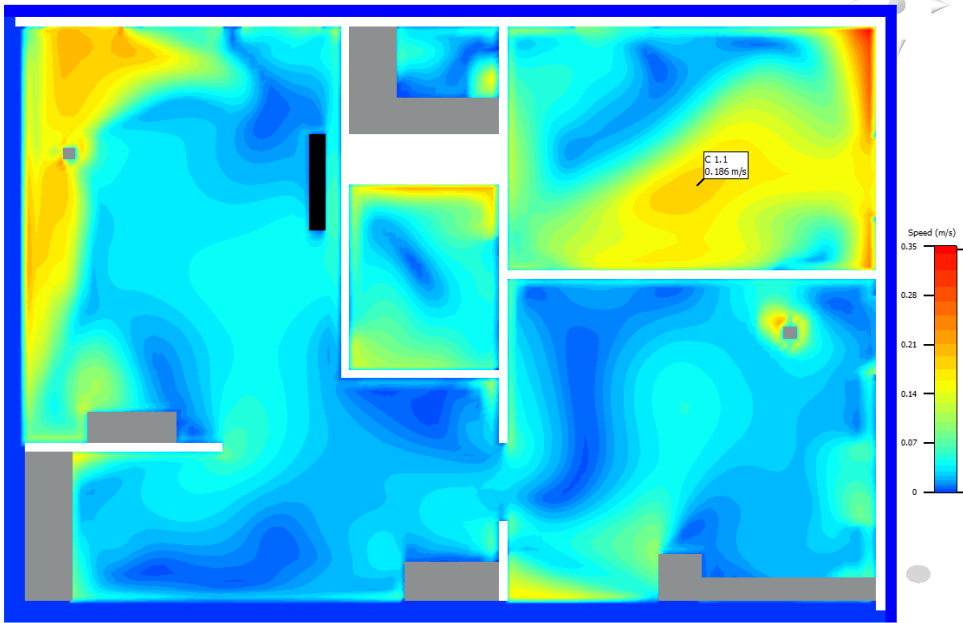
I Tabell 35 nedan redovisas de simulerade luftfarterna i alla punkter.

Tabell 35 - Simulerade luftfarter i m/s i alla punkter och fall. Farter över 0,15 m/s i vinterfallen är fetmarkerade.

Sim	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A 0.1	0,009	0,094	0,061	0,010	0,015	0,012	0,025	0,036	0,037
A 1.1	0,083	0,035	0,151	0,022	0,027	0,025	0,022	0,073	0,076
A 2.0	0,174	0,082	0,173	0,040	0,025	0,032	0,018	0,061	0,061
B 0.1	0,094	0,119	0,077	0,007	0,014	0,007	0,115	0,045	0,038
B 1.1	0,094	0,090	0,088	0,079	0,078	0,081	0,142	0,099	0,101
B 2.0	0,076	0,166	0,079	0,092	0,102	0,095	0,245	0,206	0,207
C 0.1	0,040	0,091	0,035	0,018	0,027	0,023	0,135	0,109	0,112
C 1.1	0,050	0,186	0,037	0,030	0,046	0,038	0,031	0,014	0,015
C 2.0	0,082	0,062	0,103	0,122	0,120	0,117	0,090	0,032	0,033
D 0.1	0,016	0,022	0,031	0,025	0,030	0,031	0,049	0,055	0,063
D 1.1	0,024	0,040	0,020	0,021	0,016	0,015	0,039	0,033	0,030
D 2.0	0,036	0,029	0,038	0,051	0,035	0,046	0,013	0,006	0,015
E 0.1	0,112	0,109	0,110	0,113	0,112	0,111	0,050	0,029	0,031
E 1.1	0,039	0,029	0,027	0,030	0,028	0,025	0,017	0,025	0,034
E 2.0	0,018	0,025	0,022	0,017	0,022	0,022	0,050	0,046	0,048
G 0.1	0,031	0,027	0,026	0,033	0,034	0,029	0,041	0,045	0,049
G 1.1	0,036	0,033	0,033	0,026	0,028	0,026	0,052	0,037	0,042
G 2.0	0,136	0,114	0,110	0,053	0,059	0,054	0,161	0,105	0,070
H 0.1	0,030	0,031	0,028	0,035	0,032	0,033	0,031	0,026	0,026
H 1.1	0,023	0,029	0,023	0,032	0,030	0,028	0,029	0,027	0,030
H 2.0	0,049	0,042	0,041	0,050	0,047	0,046	0,088	0,092	0,090
I 0.1	0,026	0,025	0,026	0,004	0,011	0,013	0,037	0,043	0,048
I 1.1	0,023	0,019	0,017	0,023	0,027	0,029	0,017	0,035	0,041
I 2.0	0,112	0,115	0,110	0,085	0,089	0,088	0,043	0,014	0,017

Merparten av punkterna klarar rekommendationerna för vinterfallet TQ1. Farten 0,15 m/s överskrids enstaka gånger. Simulering 1-6 är vinterfall, rekommenderade värdet för luftfarter är då 0,15 m/s för TQ1, TQ2 och TQ3, som mest överstigs detta värde i punkt C 1.1, där farten är 0,186 m/s i simulering 2. I Figur 28 nedan kan luftfartsbilden studeras för simulering 2 på höjden 1,1 m. Simulering 7-9 är sommarfall, då överskrids rekommendationen för TQ1 enbart i punkten B 2.0, men rekommendationen för TQ2 innehålls.

Luftvärme i lågenergihus



Figur 28 - Luftfartfördelningen i simulering 2 av den stora modellen, 1,1 m över golvet. Punkt C 1.1 är markerad. Observera skalan.

En intressant iakttagelse som kan göras i Figur 28 är att luftfarten är högre vid motstående vägg i sovrum och vardagsrum. Detta är ett fenomen som lätt kan missas när mätning endast sker i vissa punkter.

6.4.4 PMV och PPD

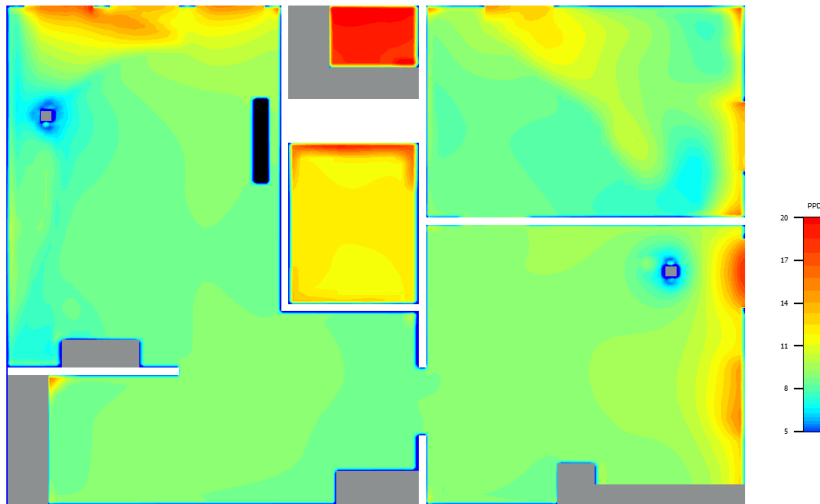
När inneklimateparametrarna PMV och PPD studeras noteras generellt låga värden i alla simuleringfall, ofta under 10 %. De flesta punkterna hamnar i klimatklass TQ1 (PPD < 10 %) och ett fåtal punkter hamnar i motsvarande TQ2 (PPD = 10 %). Simulering 4, 5, 6 och 7 sticker ut med flest punkter i klimatklass TQ1. Simulering 1, 2 och 3 ligger generellt lite högre i PPD jämfört med övriga simuleringar. I Tabell 36 nedan visas de punkter och fall där PPD visar värden på över 10 %.

Tabell 36 - Punkter och fall där PPD är större än 10 %.

Sim	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0.1		0.1, 1.1						
B	0.1	0.1		0.1		0.1	1.1, 2.0	1.1, 2.0	1.1, 2.0
C	0.1						0.1	0.1	0.1
D	0.1	0.1	0.1						
E	0.1, 1.1	0.1, 1.1	0.1, 1.1	0.1	0.1	0.1			
G	0.1	0.1	0.1						
H	0.1	0.1	0.1						
I	0.1	0.1	0.1						

Luftvärme i lågenergihus

De högsta värdena på PPD uppkommer i punkt E 0.1 (15,7-16,9 %) i fall 1-3 och i punkt B 2.0 (16,3-16,9 %) i fall 8 och 9. PMV i punkterna i Tabell 36 är negativa vilket indikerar på en något låg temperatur. Samtliga värden på PMV och PPD i den stora modellen återfinns i Bilaga E. I Figur 29 illustreras fördelningen av PPD i simulering 1 på höjden 1,1 m.



Figur 29 - PPD-fördelningen i simulering 1. Observera skalan.

6.4.5 Luftutbyteseffektivitet

Resultaten från beräkningarna av luftutbyteseffektiviteten redovisas i Tabell 37 nedan.

Tabell 37 - Beräknad luftutbyteseffektivitet från simuleringarna av den stora modellen.

Sim	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L.eff/%	66,3	65,3	63,3	61,4	76,9	76,9	79,6	62,3	59,1

Generellt höga värden på luftutbyteseffektiviteten kan iakttas. Framförallt fall 5, 6 och 7 visar höga värden.

6.4.6 Lokalt index

I Tabell 38 nedan redovisas simulerat lokalt index i alla punkter och fall i den stora modellen. Luftens lokala medelålder redovisas i Bilaga E.

Tabell 38 - Lokalt index i alla punkter och fall.

Punkt	Sim 1	Sim 2	Sim 3	Sim 4	Sim 5	Sim 6	Sim 7	Sim 8	Sim 9
A 0.1	1.18	3.12	3.27	1.11	3.62	2.78	1.56	1.88	2.40
A 1.1	1.81	3.27	3.58	1.08	3.83	3.24	1.55	1.89	2.43
A 2.0	2.07	3.12	3.52	1.11	3.33	2.99	1.53	1.90	2.45
B 0.1	2.46	3.65	3.69	1.15	3.61	3.03	1.81	1.99	2.55
B 1.1	2.23	3.32	3.65	1.30	4.05	3.59	1.64	1.82	2.35
B 2.0	1.99	3.71	3.28	1.27	3.99	3.49	1.68	1.91	2.42
C 0.1	1.17	3.26	3.12	1.08	4.41	2.87	1.69	1.93	2.48
C 1.1	1.35	4.15	3.09	1.21	4.04	3.25	1.60	1.84	2.35
C 2.0	1.84	3.56	3.22	1.24	3.80	3.36	1.66	1.98	2.52
D 0.1	1.07	0.99	1.03	1.12	1.24	1.37	1.52	1.22	1.13
D 1.1	1.10	1.27	1.10	1.14	1.23	1.37	1.46	1.05	1.20
D 2.0	1.26	1.06	1.12	1.15	1.27	1.58	1.39	0.96	0.97
E 0.1	1.27	1.03	1.06	1.16	1.30	1.43	1.51	1.30	1.06
E 1.1	1.18	1.01	1.09	1.12	1.23	1.34	1.46	1.04	1.08
E 2.0	1.30	1.04	1.11	1.11	1.21	1.33	1.45	1.04	1.13
G 0.1	1.67	1.57	1.35	1.16	1.40	1.42	1.84	1.20	1.19
G 1.1	1.01	1.14	0.96	1.05	1.29	1.29	1.84	1.21	1.17
G 2.0	1.55	1.57	1.40	1.16	1.44	1.44	1.85	1.15	1.13
H 0.1	1.63	1.47	1.26	1.15	1.40	1.42	1.85	1.21	1.18
H 1.1	1.04	1.18	0.96	1.04	1.31	1.27	1.89	1.23	1.20
H 2.0	1.06	1.12	0.97	1.03	1.26	1.25	1.73	1.15	1.15
I 0.1	1.45	1.18	0.99	1.06	1.17	1.23	1.83	1.13	1.13
I 1.1	1.45	1.06	0.95	1.04	1.25	1.25	1.66	1.16	1.16
I 2.0	1.16	1.25	1.07	1.14	1.39	1.40	1.73	1.10	1.10

I nästan samtliga simuleringar är det lokala indexet över 1 vilket innebär en bra omblandning. Generellt är det lokala indexet högre i sovrummet. Simulering 3 ger lägre värden på lokalt index i vardagsrummet.

7 Diskussion och slutsatser

I detta kapitel diskuteras resultaten, slutsatser presenteras och förslag på framtida undersökningar ges.

7.1 Diskussion

Nutidens klimatpolitik och samhällets energieffektiviseringsmål innebär att framtidens hus kommer att byggas i likhet med det som vi idag kallar för lågenergihus. Då är det viktigt för branschen att veta hur och om luftvärmesystem fungerar och bör utformas så att husen både får låg energianvändning och bra inomhusmiljö. Ur ett hållbart samhällsperspektiv är det mycket viktigt att inomhusklimatet inte äventyras. Resultaten från detta projekt kommer då att vara direkt användbara i planerings- och projekteringsskedena i byggprocessen och därmed hjälpa branschen till en bättre affärsmässighet och konkurrenskraft.

Resultaten från mätningarna antyder att risken för stora vertikala temperaturdifferenser ökar när takdon med låga kastlängder används eller låga flöden med hög temperatur tillförs. Ingen större risk för drag föreligger, fränsett området strax efter överluftsdonet. Resultaten visar på att stora luftrörelser kan uppkomma då överluftsdonet eller motsvarande öppning är liten i förhållande till flödet. Ett fenomen som kan iaktas då överluften går under dörren är att isovelen smalnar av en bit in i rummet med en högre luftfart som följd. Samma fenomen märks inte då överluften går över dörren, men detta kan bero på frånluftdonets placering eller rummets möblering eller liknande. Detta gör dragrisken oförutsägbar eftersom det inte räcker att jämföra överluftdonets area med aktuellt flöde.

Risken för stora vertikala temperaturskiktningar och kortslutning av ventilationen tenderar att bli större när överluften går över dörren eller genom öppen dörr. Detta visar sig i både mätningar och motsvarande simuleringar. När överluften ges chansen att transportera sig mellan rummen i närheten av taket riskeras att omblandningen i köket blir lidande och en kortslutning kan uppstå. Med andra ord innebär detta att man inte kan öppna dörrar mellan rum i lägenheten. Det är naturligtvis orimligt att ha en sådan begränsning i en bostad.

När luftkvaliteten i form av luftutbyteseffektivitet studeras i mätningarna erhålles väldigt höga värden i många av fallen. Värdena anses så höga att något slags mätfel, som inte fullständigt kan förklaras, misstänks ha inträffat. Troligtvis är en stor del i detta förhöjda ventilationsflöden, då dessa var svåra att reglera. Detta leder till att det blir svårt att dra några slutsatser vad gäller denna parameter. Däremot när luftutbyteseffektiviteten beräknas för simuleringarna som motsvarar mätningarna erhålls värden som verkar mera rimliga. Dessa värden visar något förvånande resultat, nämligen att en något högre luftutbyteseffektivitet uppnås med låga flöden och detta tyder på att resultaten kan vara missvisande. I några av simuleringfallen kan inte luftutbyteseffektiviteten beräknas eftersom värdena på luftens lokala medelålder, som används för det, inte har kunnat beräknas korrekt av FloVENT®. Luftens lokala medelålder varierar helt sporadiskt från noll till ett par hundra tusen sekunder. Resultaten visar att luftutbyteseffektivitet och lokalt index

är svärmätta och svårsimulerade storheter, därmed bör resultaten som presenterats tolkas med försiktighet.

När PMV och PPD från simuleringarna som motsvarar mätningarna studeras kan genomgående höga värden på PPD iakttas vilket innebär att termisk komfort inte har uppnåtts. Samtidigt är värdena på PMV negativa vilket betyder att den upplevda temperaturen är lägre än önskvärt. Det är möjligt att om temperaturen på tilluften justeras upp att värden på PPD blir betydligt bättre. Dock måste risken för att luftutbyteseffektiviteten kan bli sämre beaktas. Den eventuella konflikten med brukares önskemål om ett svalt sovrum bör också beaktas. Beräkningarna är dessutom baserade på en aktivitetsnivå hos personerna som motsvarar sittande lugn aktivitet och personernas beklädnad har satts till 1 clo. Om något mer ansträngande aktiviteter utförs medger detta andra värden på PPD och PMV, till exempel matlagning eller städning, det inte heller orimligt att aktivitetsnivån faktiskt är lägre.

När mätningarna jämförs med motsvarande simuleringar finnes att datormodellen i vissa avseenden stämmer bra överens med mätningarna. Särskilt temperaturfördelningen är väldigt lik mellan simulering och mätning. Luftfarternas överensstämmelse varierar, vid några mätpunkter skiljer sig resultatet avsevärt, men i det stora hela kan samma trender ses. Detta kan förklaras med att luftströmlinjer är väldigt känsliga och eftersom stativets placering i mätlägenheten inte stämmer helt överens med hur de är placerade i datormodellen kan detta ge olika resultat. När jämförelse av luftkvalitet görs är trenden att simuleringarna visar högre värden på lokala index i framförallt sovrummet. Dock visar beräkningar av luftutbyteseffektiviteten att simuleringarna ger lägre värden än mätningarna. Jämförelsen mellan resultaten är inte helt tillfredställande, och det kan konstateras att storheterna är mät- och simuleringsvänliga i fallande ordning: temperatur, luftfarter, luftutbyteseffektivitet. Det är inte helt önskvärda resultat som erhålls vid jämförelsen.

Temperaturfördelningen mellan rummen i den stora modellen ser bra ut. Dock tenderar ett lägre flöde med hög temperatur att ge värre vertikala temperaturdifferenser i vissa punkter. Den operativa temperaturen ser även den bra ut och tenderar att ligga mellan 21 och 24 grader vilket stämmer överens bra med gällande rekommendationer. En avgörande skillnad på stora och lilla simuleringen är att den tillförda effekten i den stora simuleringen översteg effektbehovet, medan den tillförda effekten i den lilla simuleringen precis täckte effektbehovet. Detta beror inte på att effektbehovet är felberäknat utan att den satta måltemperaturen var 22 grader hos rumsluften, medan rekommendationen gäller operativ temperatur. I den stora simuleringen finns människor som vardera avger 100 W.

Luftfarterna i den stora modellen är generellt låga. När undertempererad tilluft tillförs kan risk för höga farter uppkomma vid motstående vägg i sovrummet uppstå. I övrigt kan viss risk för drag förekomma i vistelsezonens undre och övre gräns föreligga i framförallt sovrummet. Höga luftfarter som uppkommer vid motstående vägg kan undvikas att bli komfortproblem om den motstående väggen är en yttervägg, då uppstår de höga luftfarterna utanför vistelsezonen, dock kan detta ge bakslag eftersom de allra flesta brukare

förmodligen inte ens känner till att Boverket har definierat en zon inom vilken man bör vistas.

När temperaturer och luftfarter vägs samman i PMV och PPD blir det återigen bra värden, $PPD < 15\%$. PMV indikerar en något sval temperatur i förhållande till aktivitetsnivån. Dock visar PPD värden mellan 5 och 15 procent vilket är får anses vara godtagbara resultat. När det höga flödet med lägre temperatur körs ökar PPD något vid golvnivå ($PPD = 10-15\%$). Detta anses dock inte ge några problem med inomhusklimatet. Vid PPD-värden som är så pass låga kan förmodligen en manuellt styrd termostat få värdena att sjunka ytterligare, då varje brukare kan påverka börvärdet själv.

Beräkning av luftutbyteseffektivitet ger höga värden i samtliga fall, 63-80 procent. Högst värde erhålls vid det låga flödet, både med hög övertemperatur med överluft under eller över dörr och med undertemperatur med öppen dörr. Att undertempererad tilluft med lågt flöde och öppen dörr ger högst värde kan förklaras med att den lägre temperaturen gör att tilluften faller ner i rummet och blandar sig bra med rumsluften enligt teorin om temperaturstyrd omblandning.

Att även det låga flödet med hög övertemperatur ger höga värden på luftutbyteseffektiviteten kan förklaras med att omblandningen blir bra i enlighet med teorin om omblandning med höghastighetsteknik. När de väggmonterade donen diskuteras är det viktigt att komma ihåg att det alltid är samma flöde i varje don, 5 l/s. Skillnaden mellan det låga och det höga flödet är att färre eller fler don används. Det kan vidare även tänkas att omblandningen för de väggmonterade donen blir bättre med lågt flöde eftersom det då finns mer rumsluft för varje jetstråle att blanda sig med.

Sättet hur överluften går verkar inte påverka luftutbyteseffektiviteten lika tydligt som under mätningarna och simuleringarna av den lilla modellen. Lokala index tenderar att vara högre i sovrummet jämfört med resten av lägenheten. I sovrummet vistas brukare längst tid och är mest utsatta, eftersom de mestadels av tiden sover där. Dock uppfylls rekommendationen på minst 90 procent överallt i lägenheten. När undertempererad tilluft tillförs tenderar fördelningen av de lokala indexen att bli mer jämn i hela lägenheten.

En rimlig förklaring till varierande lokala index i lägenheten under mätningen skulle kunna vara att läckaget inte kan kontrolleras under mätningarna. Tryckprovningen talar också mot denna teori, eftersom lägenheten visade sig vara relativt tät. Dock varierade till- och frånluftsflödena under mätningen, vilket kan ha påverkat. Men vidare visar simuleringarna, som är helt läckagefria, också en skillnad i lokalt index.

Om krav och rekommendationer för inomhusklimat ej hårddras uppnås termisk komfort i den stora modellen i fallen 1, 2, 3, 7, 8 och 9, fallen med högt flöde och lägre tilluftstemperatur samt sommarfallen med undertempererad tilluft och lågt flöde. Dock är det alltid minst en mätpunkt som inte uppfyller krav eller rekommendationer. Antalet undermåliga punkter anses dock vara försumbart. Fall 4, 5 och 6, fallen med lågt flöde och

hög tilluftstemperatur visar fler punkter med dåliga resultat, framförallt vad gäller vertikal temperaturdifferens. Alla fall erhåller godkända värden för luftutbyteseffektivitet och lokala index. Dock är dessa storheter precis som tidigare behäftade med en viss osäkerhet.

Undersökningen som gjordes av EMPA i Schweiz visade på att ett gott inomhusklimat kan uppnås när övertempererad tilluft tillförs ett rum med ett lågt effektbehov. Det skulle kunna tänkas att den stora skillnaden i tillförd effekt skulle synas i inomhusklimatet men så verkar inte vara fallet. Undersökningarna som är gjorda i detta projekt visar samma indikationer, även för flera rum med något högre effektbehov.

7.2 Slutsats

Simuleringsprogram är ett användbart verktyg och lämpligt att använda istället för mätningar för att spara tid och pengar. Dock bör simuleringar jämföras med mätningar och människors åsikter. Simuleringar är inte verkligheten, vad det gäller luftutbyteseffektivitet och liknande parametrar har det visats i detta arbete. Temperaturer däremot visar sig bli i stort sett samma oavsett om de kommer från mätning eller simulering. Vad det gäller temperaturer är simuleringar fullt trovärdiga.

Simuleringar och mätningar indikerar att problem med inomhusklimatet kan uppstå vid väggar motstående de väggplacerade väggdonen. Stor hänsyn till kastlängd bör tas vid val av tilluftsdon.

När överluft endast dras genom en springa över eller under dörr finns det en risk för att dragproblem kan uppstå i dessa områden när flödet genom denna är relativt stort. Andra lösningar i form av flera överluftsdon kan vara ett sätt att minska risken för drag.

Även om resultaten för mätningarna av luftutbyteseffektivitet är spretiga är det enbart ett fåtal fall som inte uppfyller kraven, vad gäller lokalt index uppfyller några av fallen bl a två fall med öppen dörr ej rekommendationerna. (s. 47 avsnitt 6.1.5 uppfyller 4 av 11 fall ej lokalt index, två av tre fall med öppen dörr uppfyller ej.)

Resultaten från mätningarna översteg ofta det förväntade värdet med stor marginal, ibland erhöles t o m ej helt rimliga värden och två simuleringar gav inga resultat alls. Det finns alltså en stor osäkerhet kring dessa storheter. Möjliga osäkerheter och felkällor har identifierats under arbetets gång vilka bör utredas för att kunna dra säkra övergripande slutsatser. Resultat för luftfarter och olika former av temperaturer är säkrare och det är enbart ett fåtal punkter som inte uppfyller kraven. I stort tycks resultaten från mätningarna visa på att Boverkets krav på inomhusklimat uppfylls med ett kombinerat system för värme och ventilation, liksom många av de rekommendationer som finns.

Resultaten visar att i några av de simulerade fallen uppnås termisk komfort och tillfredsställande luftkvalitet i form av luftutbyteseffektivitet och i några av de studerade fallen uppnås inte termisk komfort och bra luftkvalitet. Dock sägs detta med reservation för att det enbart gäller de planlösningar som har testats i undersökningarna. Fler mätningar och

simuleringar, samt mänskliga åsikter bör vägas in innan det är säkert att säga att luftburen värme ger ett bra inomhusklimat.

Under arbetets gång har ett antal felkällor och avvikande värden identifierats i metoderna, framförallt i mätningarna. För att slutsatser kring systemets funktion ska kunna dras måste dessa först utredas innan själva resultaten kan bedömas vara klara (tillförlitliga).

7.3 Framtida undersökningar

Genom att först genomföra jämviktssimuleringar för att göra parameterstudier kan intressanta fall fångas upp för att sedan simuleras i transienta fall. Detta leder till att en eller flera optimala kombinationer hittas. Det leder även till kännedom om vilka kombinationer som inte fungerar. Detta lämnas dock till framtida undersökningar. Intressanta parameterstudier kan vara:

- tilluftstemperatur-ventilationsflöde
- rummens dimensioner
- överluftsdonspaceringar
- överluftsdonstorlekar
- effektbehov

Undersökningar som kan vara intressanta att utföra i ämnet är att studera systemet i en hel byggnad. Bör värmningen av luften ske centralt eller enskilt för varje lägenhet eller till och med för varje rum? Hur mycket extra utrymme kommer kanalerna kräva på grund av eventuellt ökat flöde och ökad isoleringsmängd? Även en ekonomisk analys är intressant i syfte att utreda om det verkligen finns en ekonomisk vinning i att använda luftvärme, eller om systemet kommer att behöva vara så komplext att det kostar lika mycket eller mer än de konventionella från-tilluftssystemet och radiatorsystem. Vidare behövs vidare analys av hur man ska hantera luftutbyteseffektivitet i bostäder där luften går från rum till rum.

8 Referenslista

8.1 Tryckta källor

Abel, E. Elmroth, A. (2008). *Byggnaden som system*, (2:a upplagan). Stockholm: Formas.

Anderson, J.D. (2009). *Computational Fluid Dynamics - An introduction*, tredje upplagan, kapitel 1. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1992, 1996, 2009.

Boverket (2011). *Regelsamling för byggande, BBR 2012* (1:a upplagan). Karlskrona: Boverkets publikationsservice.

Bruegmann, R. (1978). *Central heating and forced ventilation: Origins and effects on architectural design*. Journal of the society of architectural historians, Vol 37, no 3 (October 1978), ss 143-160. University of California press.

Erlandsson, M. Ruud, S. Sandberg, E. Blomsterberg, Å. Eek, Hans. Ingulf, O. (2012). *Kravspecifikation för nollenergihus, passivhus och minienergihus - Bostäder. FEBY 12*. Stockholm: Sveriges centrum för nollenergihus.

Fanger, P.O. (1997). *Danvak Grundbog (Varme- og klimateknik)*, andra utgåvan. Danmark: Danvak.

Feist, W. (2005). *Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept*. Energy and Buildings 37 (2005) ss. 1186–1203.

Janson, U. (2010). *Passive houses in Sweden - From design to evaluation of four demonstration projects*. Institutionen för arkitektur och byggd miljö, Lunds Universitet, Lund.

Jensen, L. Warfvinge, C. (2001). *Värmebehovsberäkning*. Kursmaterial Installationsteknik FK. Lunds tekniska högskola. Lund.

Johansson, D. (2010). *Numerical data on degree hours, running times and temperature frequencies*. Institutionen för bygg- och miljöteknologi, LTH. Lund.

Mentor Graphics. (2011). *FloVENT® User Guide, Software version 9.2*. Oregon.

Nevander, L-E. Elmarsson, B. (1994). *Fukthandbok - Praktik och teori* (3:e utgåvan). Stockholm: Svensk byggtjänst.

Nilsson, P-E. (2000). *God Inomhusmiljö*. Rapport nr 2000:02. Göteborg: Centrum för effektiv energianvändning, CEE.

Sandberg, M. Blomqvist, C. Stymne, H. Mattsson, M. (1995), *Ventilation i funktion*. Gävle: Meyer information och Förlag AB.

Sandin, K. (1996). *Värme och fukt*. Institutionen för byggnadsteknik, Byggnadsfysik. Lunds tekniska högskola. Lund.

Sikander, E. Ruud, S. Fyhr, K. Svensson, O. (2011). *Erfarenhetsåterföring från de första passivhusen - inomhusmiljö, beständighet och brukarvänlighet*. SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås.

Socialstyrelsens författningssamling. (2005). *Temperatur inomhus*. SOSFS 2005:15 (M) Allmänna råd. Stockholm. Socialstyrelsen.

The International Organization for Standardization. (2005). *ISO 7730:2005(E)*. Genève, Schweiz.

VVS Tekniska Föreningen. (2000). *Klassindelade Inneklimatsystem, Riktlinjer och specifikationer, R1*. Stockholm.

Warfvinge, C. (1996). *Beräkning av inneklimat i luftvärmade rum*. Rapport TABK-96/1007. Institutionen för byggnadskonstruktionslära. Lunds tekniska högskola.

Warfvinge, C. (2007). *Installationsteknik AK för V*. Upplaga 3:2. Studentlitteratur. Lund.

8.2 Elektroniska källor

Mentor Graphics. Tillgänglig

<<http://www.mentor.com/products/mechanical/products/flovent>> [Hämtat 2012-02-15]

Sveriges Geologiska Undersökning. *Jordarter 1:1M, Rikstäckande*. Tillgänglig

<http://vww.sgu.se/sguMapView/web/sgu_MV_jona.html> [Hämtat 2012-05-24]

Bilaga A Tryckprovning



BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 2012-04-19

Technician: PCa

Test File: Tomelilla

Customer:

Building Address:

	<u>Depressurization</u>	<u>Pressurization</u>	<u>Average</u>
Test Results at 50 Pascals:			
V50: Airflow (lps)	37 (+/- 0.4 %)	21 (+/- 1.0 %)	29
n50: Air Changes per Hour (1/h)	1.77	0.98	1.38
w50: lps/m ² Floor Area	1.18	0.65	0.92
q50: lps/m ² Surface Area	0.32	0.18	0.25
Leakage Areas:			
Canadian EqLA @ 10 Pa (cm ²)	48.3 (+/- 2.4 %)	19.7 (+/- 6.0 %)	34.0
cm ² /m ² Surface Area	0.41	0.17	0.29
LBL ELA @ 4 Pa (cm ²)	24.5 (+/- 3.6 %)	8.4 (+/- 9.2 %)	16.4
cm ² /m ² Surface Area	0.21	0.07	0.14
Building Leakage Curve:			
Air Flow Coefficient (Cenv)	2.4 (+/- 5.5 %)	0.6 (+/- 14.0 %)	
Air Leakage Coefficient (CL)	2.4 (+/- 5.5 %)	0.6 (+/- 14.0 %)	
Exponent (n)	0.701 (+/- 0.014)	0.891 (+/- 0.035)	
Correlation Coefficient	0.99843	0.99380	

Test Standard: EN 13829

Regulation complied with:

Type of Test Method: B

Equipment: Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door

Inside Temperature: 19 °C

Volume: 75 m³

Outside Temperature: 20 °C

Surface Area: 117 m²

Barometric Pressure: 101325 Pa

Floor Area: 31 m²

Wind Class: 0 Calm

Uncertainty of

Building Wind Exposure: Highly Protected Building

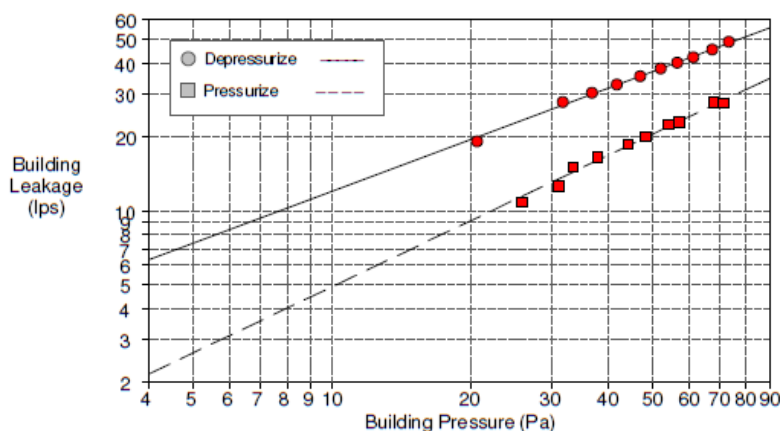
Building Dimensions: 3 %

Type of Heating: Vattenburen värme från fjärr

Year of Construction: 2012

Type of Air Conditioning:

Type of Ventilation: None



Luftvärme i lågenergihus

BUILDING LEAKAGE TEST Page 2

Date of Test: 2012-04-19 Test File: Tomellilla

Comments

Vid test skall följande fyllas i,
 Indoor Temperature
 Outdoor Temperature
 Wind Class
 Building Wind Exposure

Data Points: Depressurization:

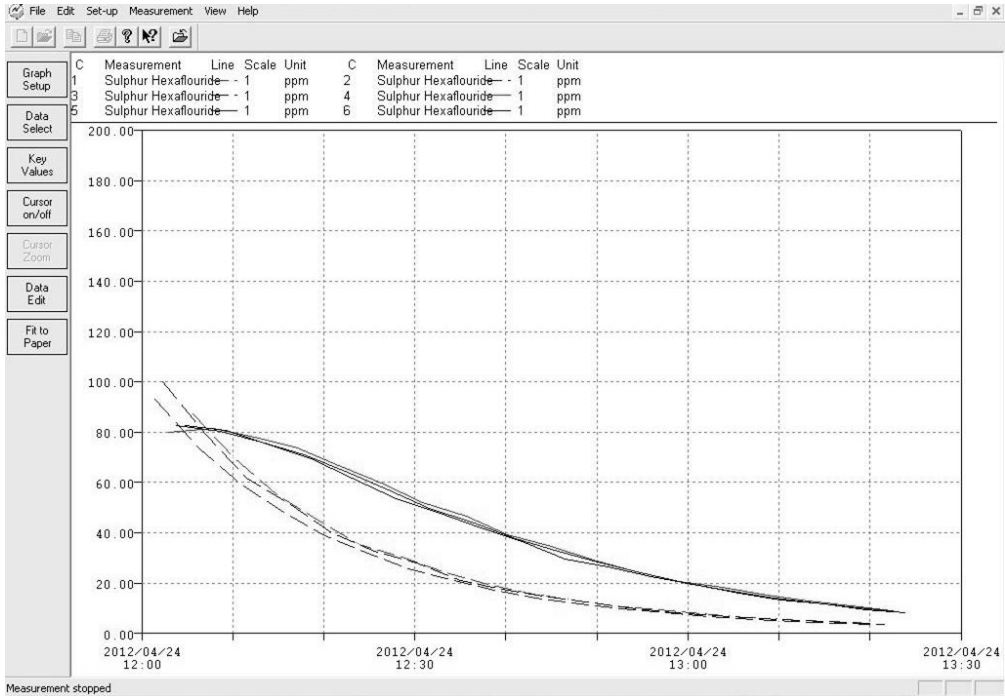
Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (lps)	Temperature Adjusted Flow (lps)	% Error	Fan Configuration
-0.1	n/a				
-73.3	72.4	49	49	0.9	Ring C
-67.5	62.9	45	45	-0.6	Ring C
-61.3	54.9	42	42	-0.8	Ring C
-56.6	49.4	40	40	-0.6	Ring C
-52.0	44.4	38	38	-0.2	Ring C
-47.1	38.8	35	35	-0.1	Ring C
-41.8	33.4	33	33	0.3	Ring C
-36.9	28.6	30	30	1.1	Ring C
-31.9	24.2	28	28	2.8	Ring C
-20.8	30.8	19	19	-3.9	Ring D
-0.1	n/a				
Test 1 Baseline (Pa):	p01- = -0.1	p01+ = 0.0	p02- = -0.1	p02+ = 0.0	

Data Points: Pressurization:

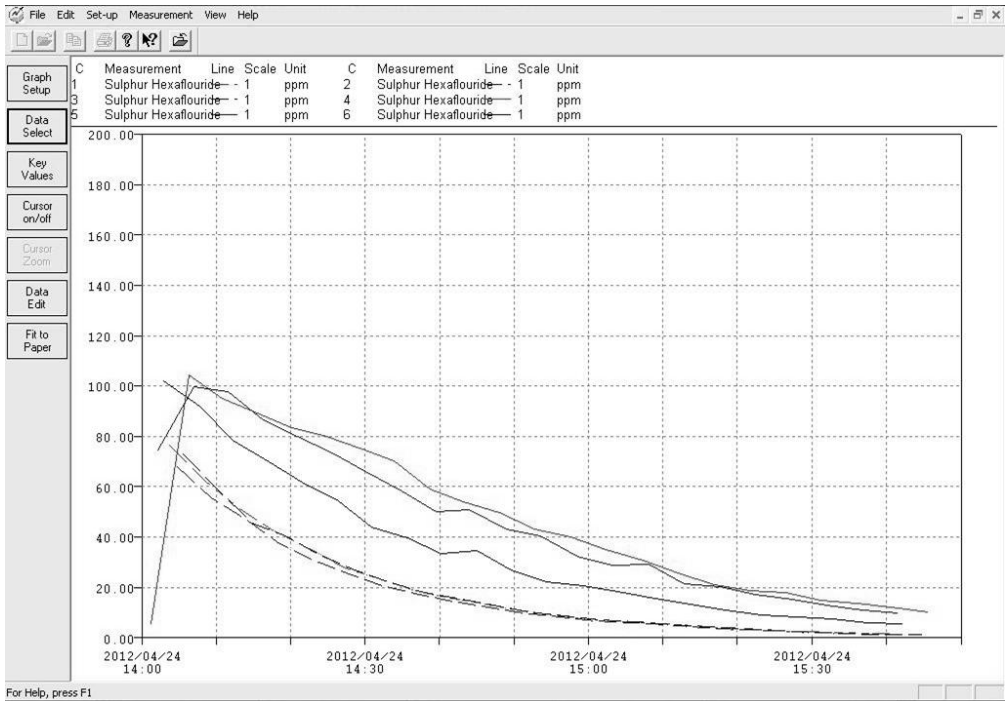
Nominal Building Pressure (Pa)	Fan Pressure (Pa)	Nominal Flow (lps)	Temperature Adjusted Flow (lps)	% Error	Fan Configuration
-0.1	n/a				
71.4	23.9	27	27	-3.1	Ring C
67.9	64.0	28	28	2.1	Ring D
57.1	43.9	23	23	-1.5	Ring D
54.3	42.4	23	22	1.3	Ring D
48.2	33.8	20	20	0.4	Ring D
44.3	29.5	19	19	1.1	Ring D
38.0	23.0	17	16	2.1	Ring D
33.7	19.3	15	15	4.3	Ring D
31.4	79.4	13	13	-7.1	Ring E
26.0	59.1	11	11	-5.7	Ring E
0.1	n/a				
Test 1 Baseline (Pa):	p01- = -0.1	p01+ = 0.0	p02- = 0.0	p02+ = 0.1	

Bilaga B Avklingningskurvor från spårgasmätning

Mätfall 1

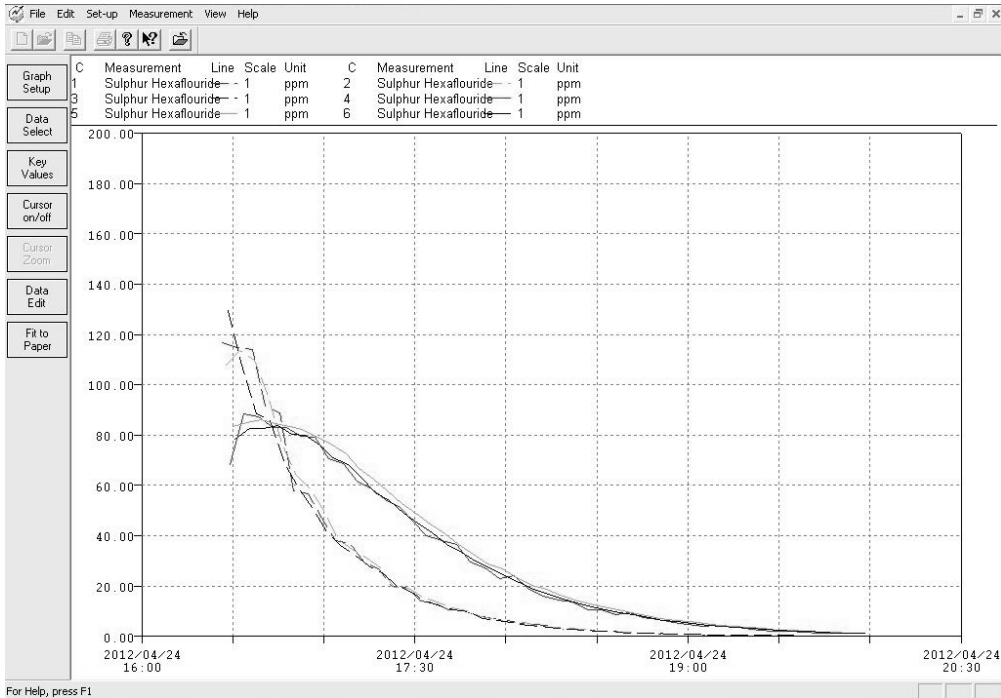


Mätfall 2

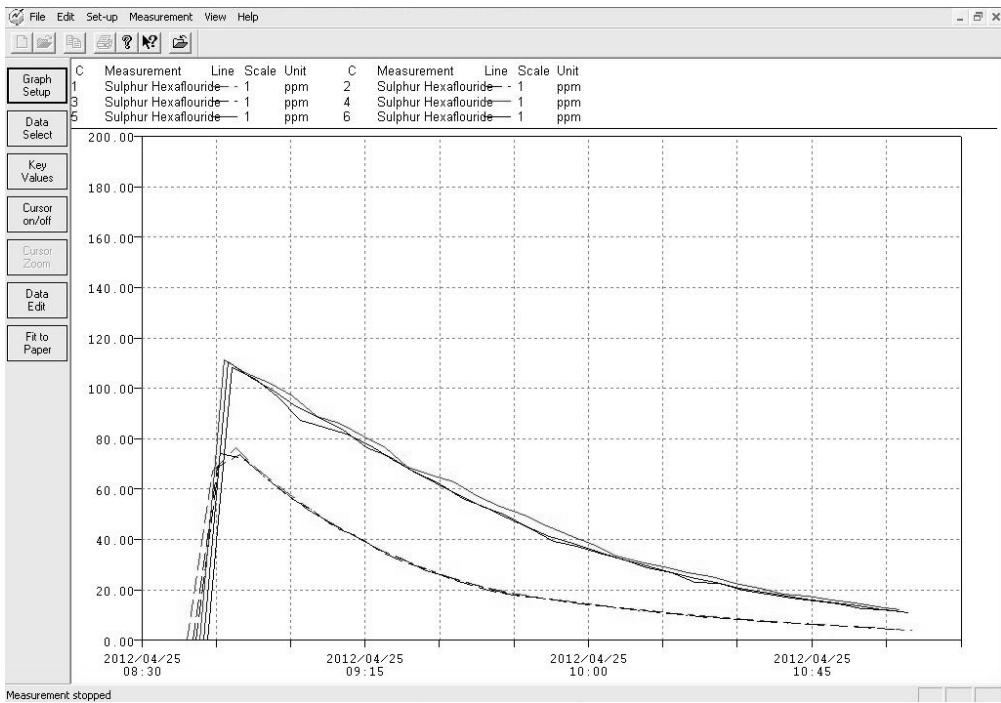


Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 3

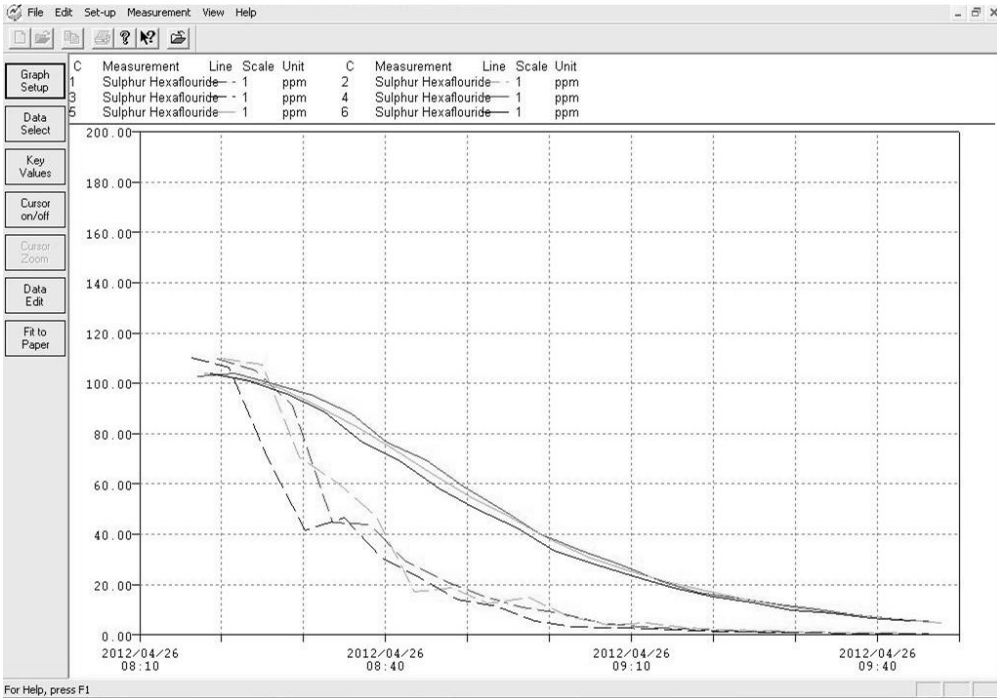


Mätfall 4

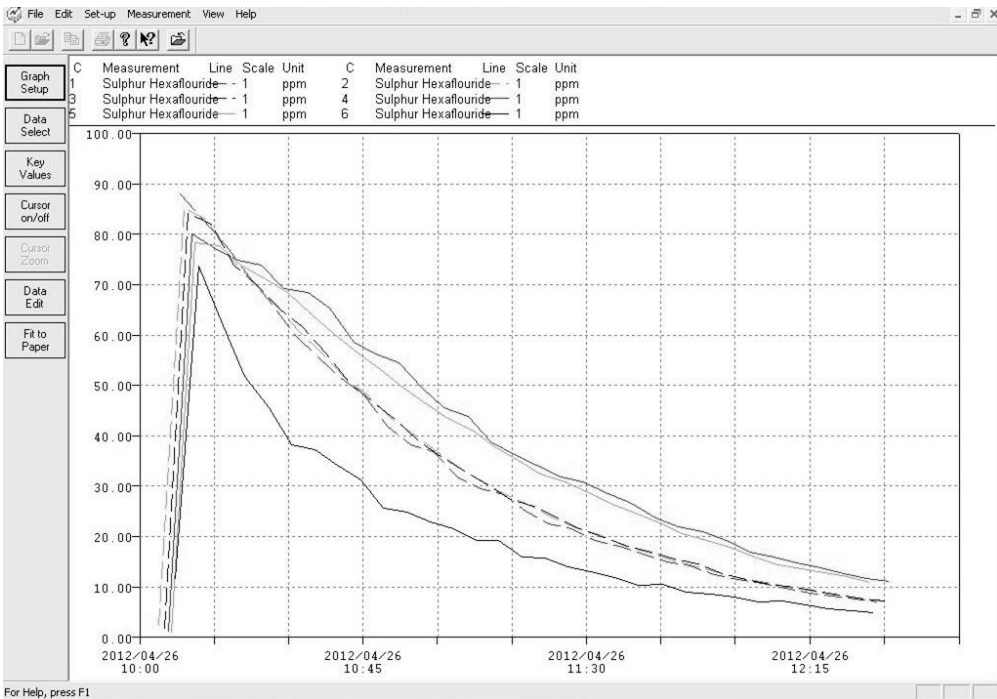


Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 5

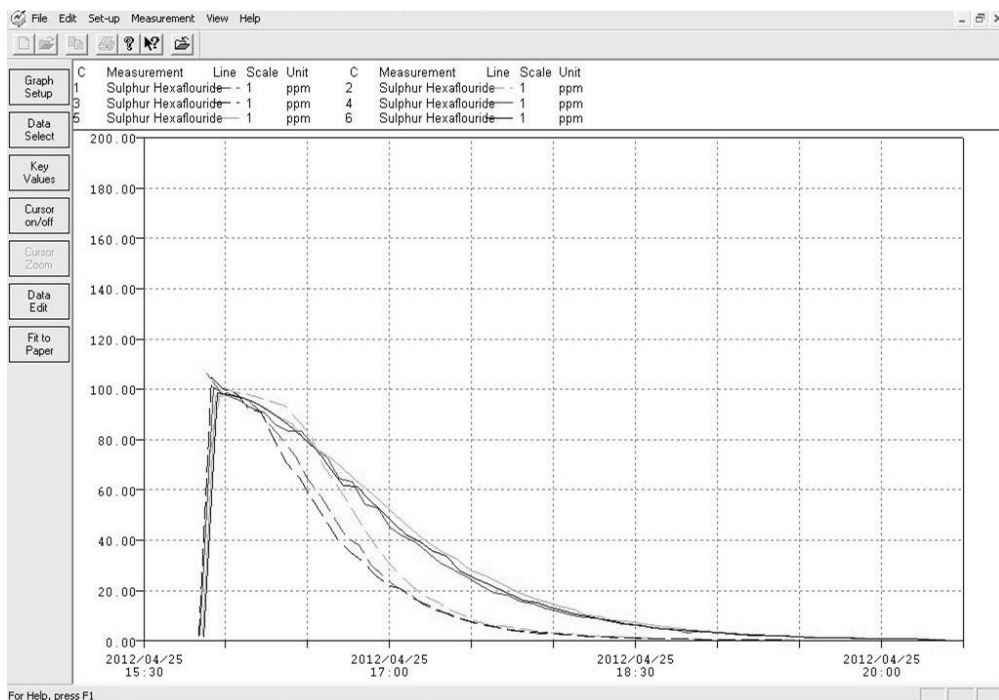


Mätfall 6

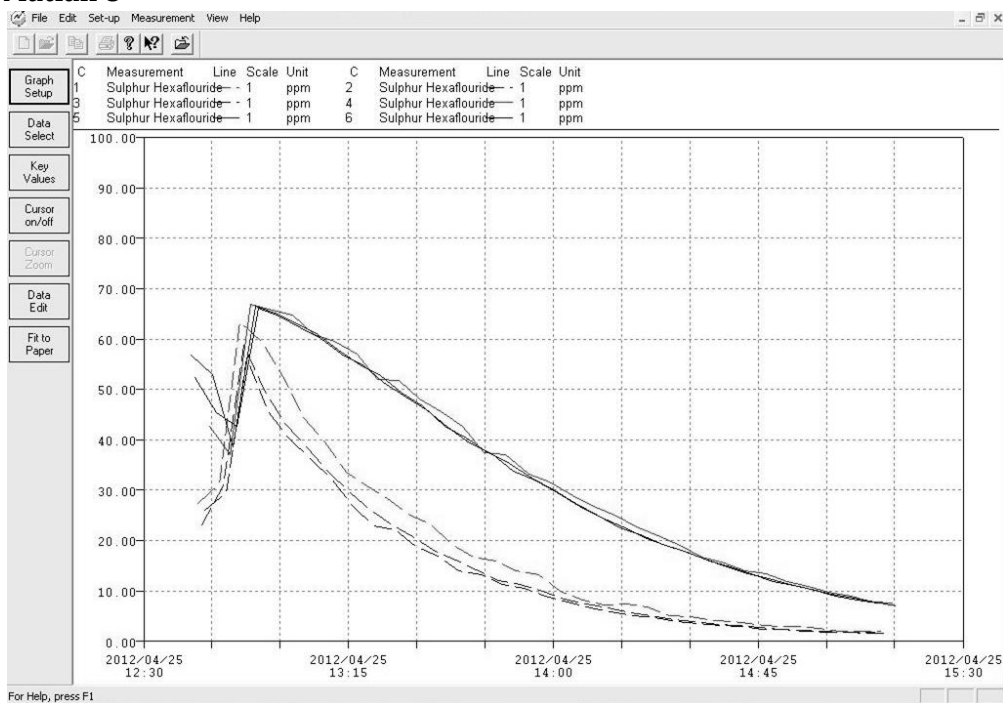


Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 7

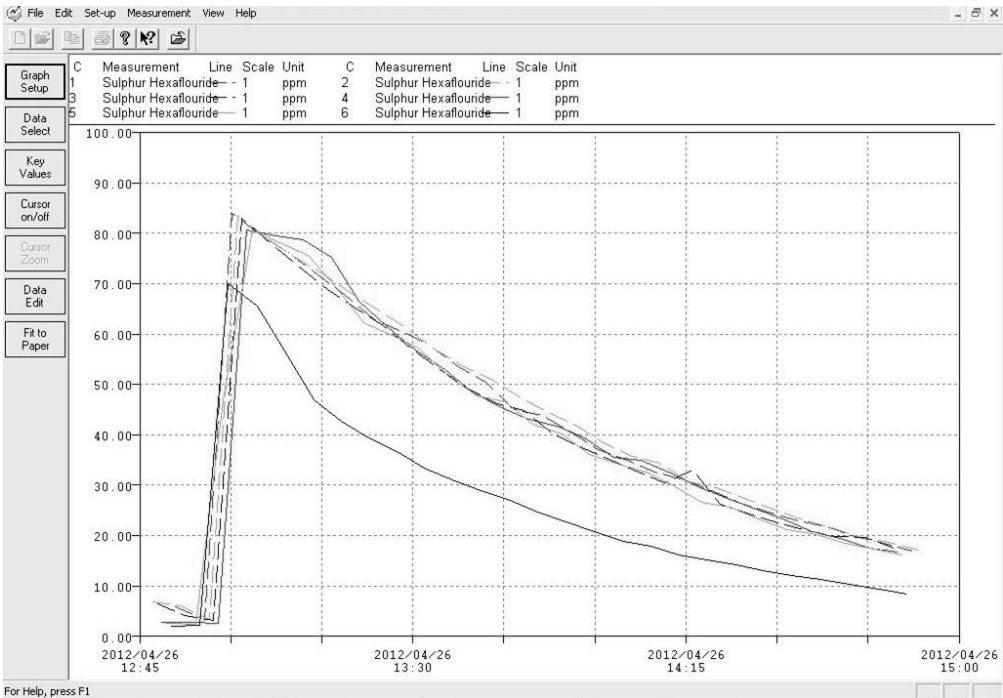


Mätfall 8

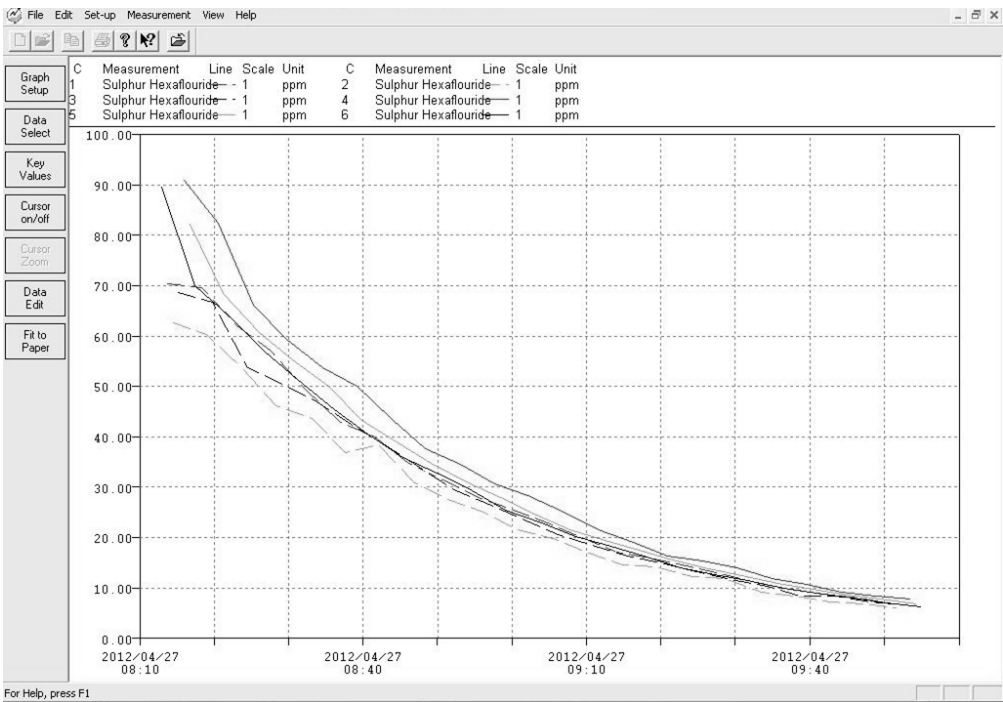


Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 9

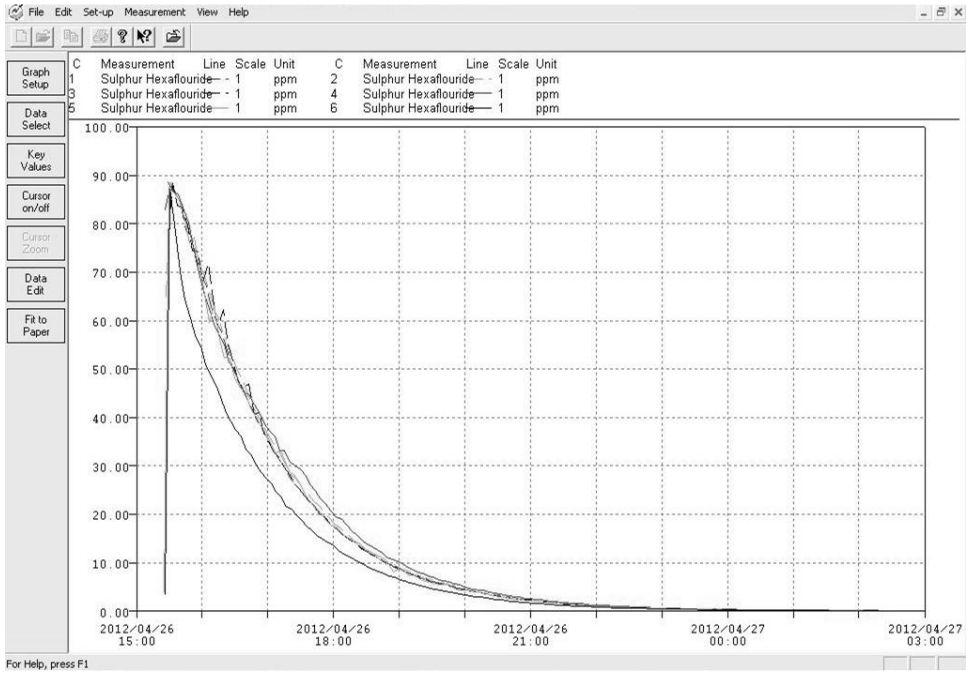


Mätfall 10



Luftvärme i lågenergihus

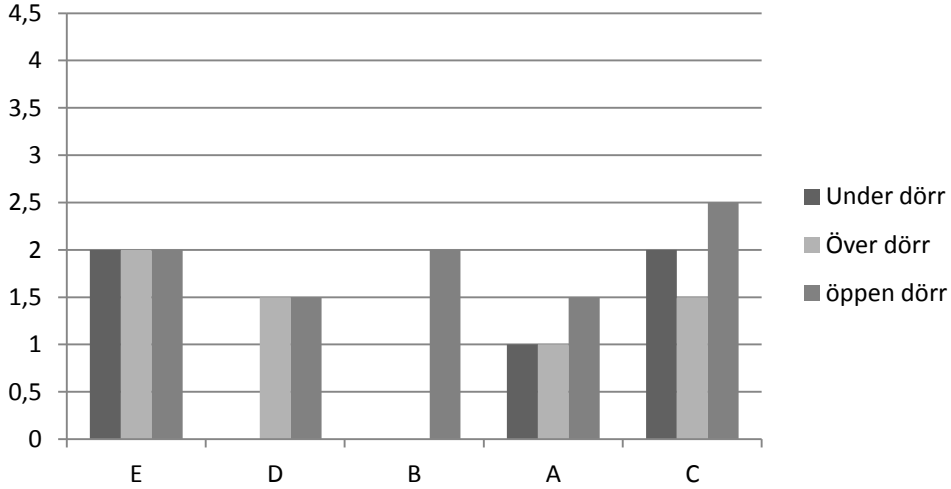
Mätfall 11



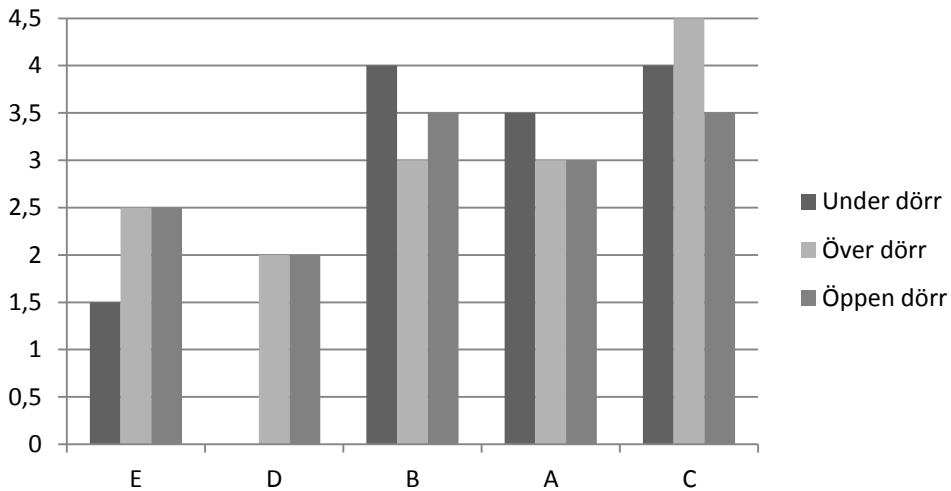
Bilaga C Jämförelse variabler, mätning

C.1 Evakuering av överluft

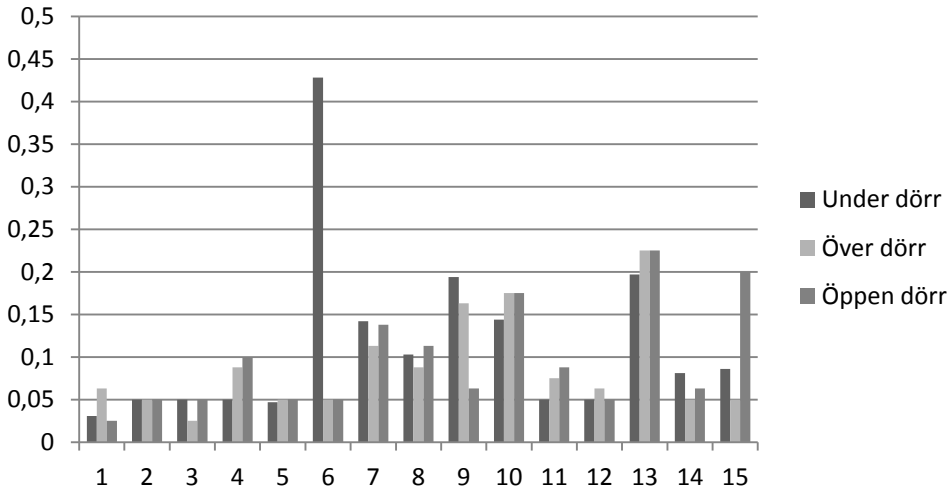
Vert. Temp.diff väggdon, 30/34



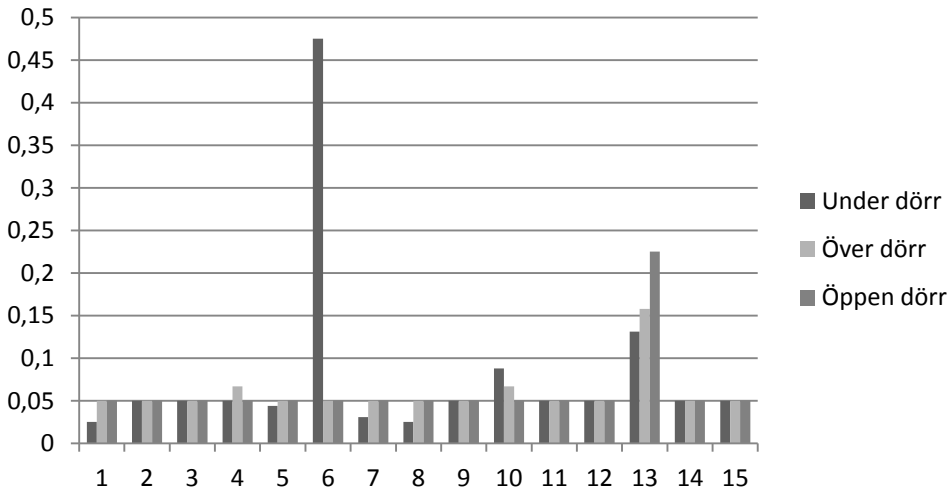
Vert. Temp.diff takdon, 30/34



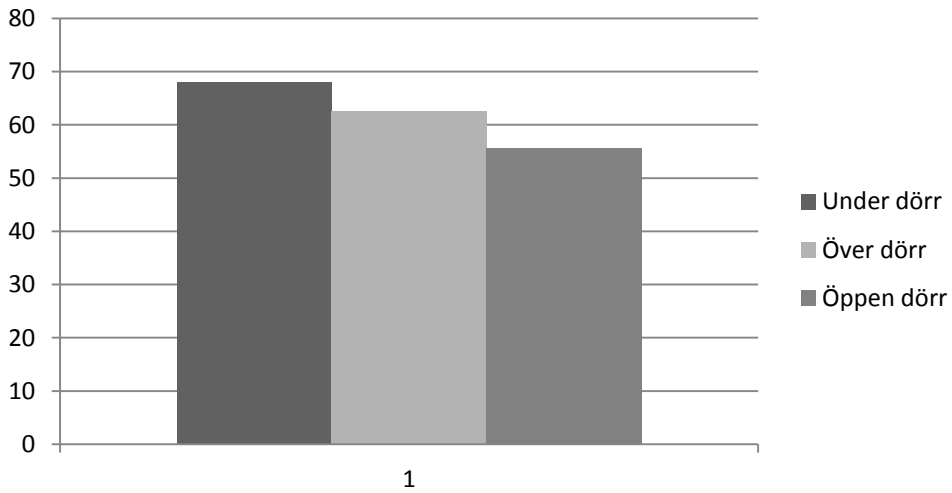
Hastighet med väggdon, 30/34



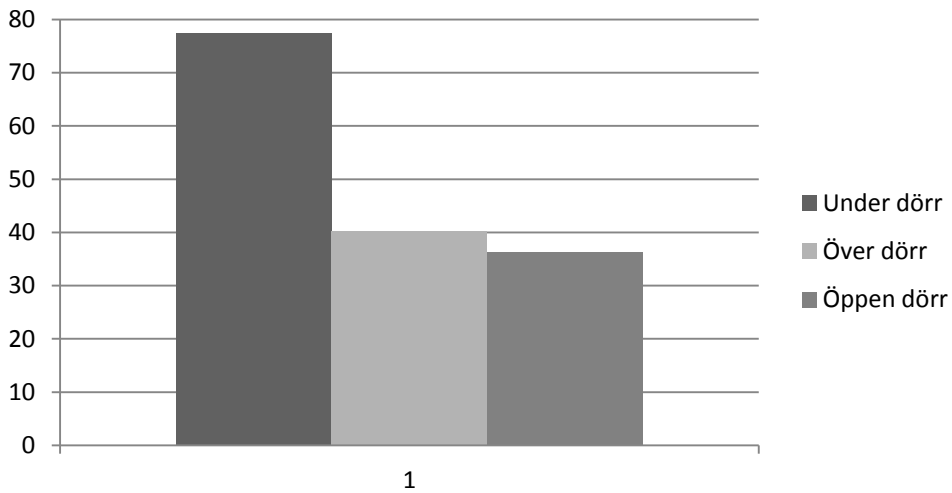
Hastighet med takdon, 30/34



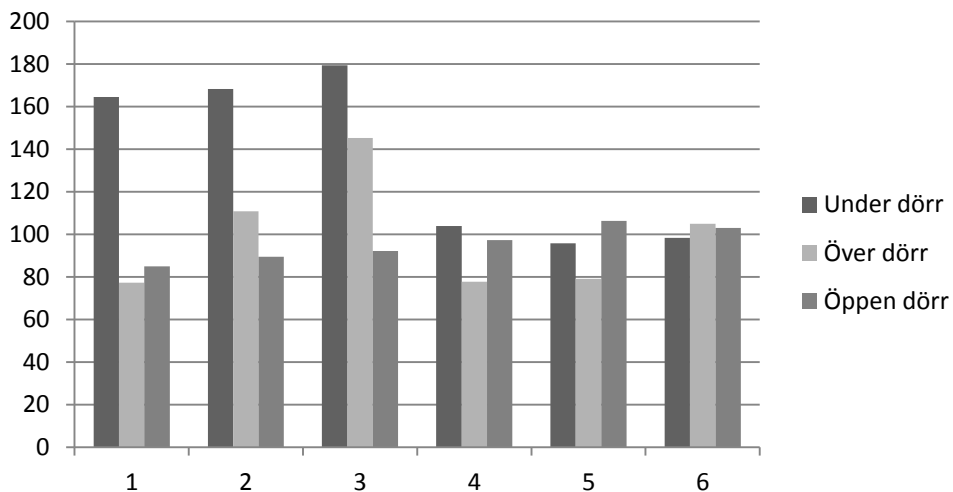
L.eff. Med väggdon, 30/34



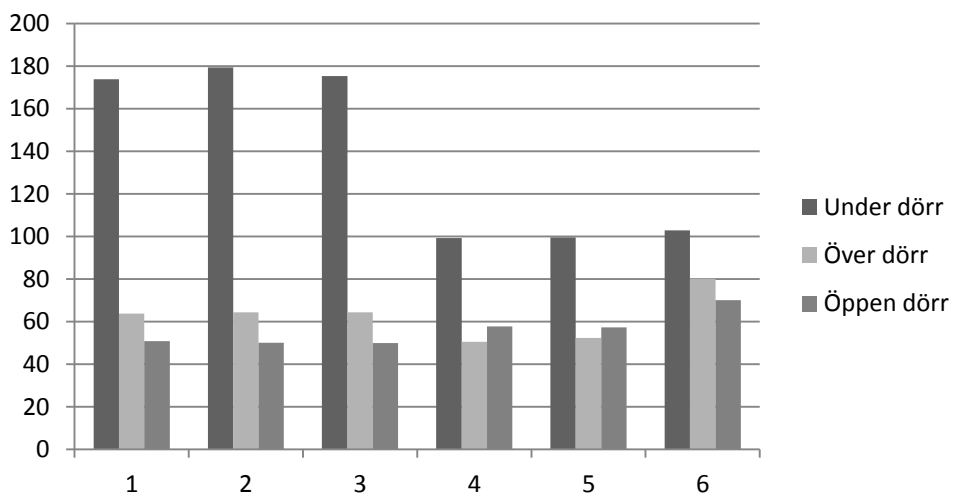
L.eff. Med takdon, 30/34



Lokalt index med väggdön, 30/34

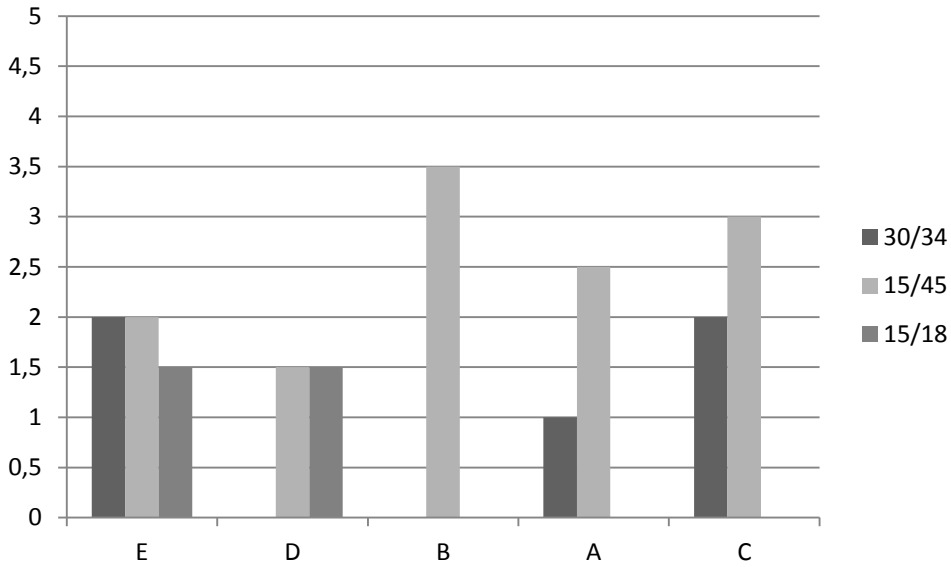


Lokalt index med takdön, 30/34

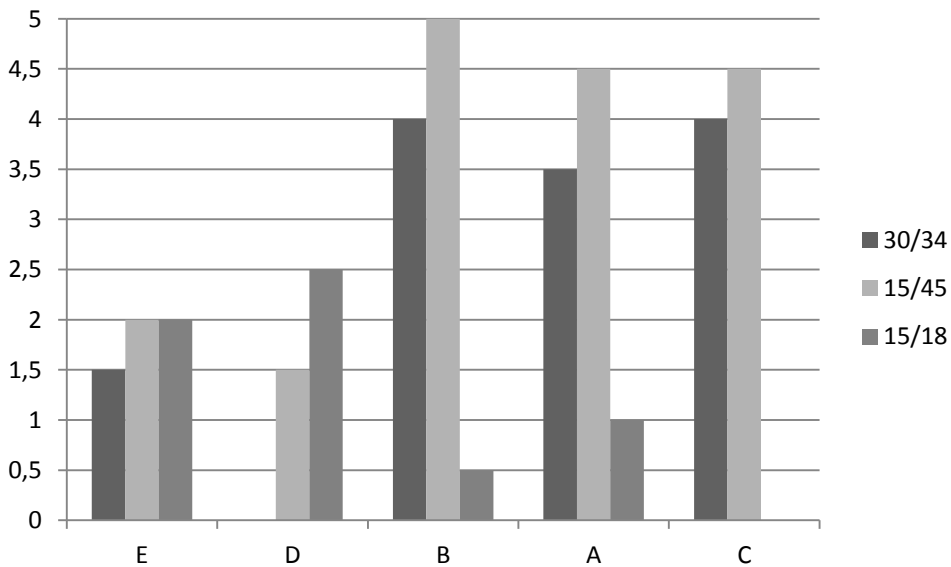


C.2 Flöde/temperatur

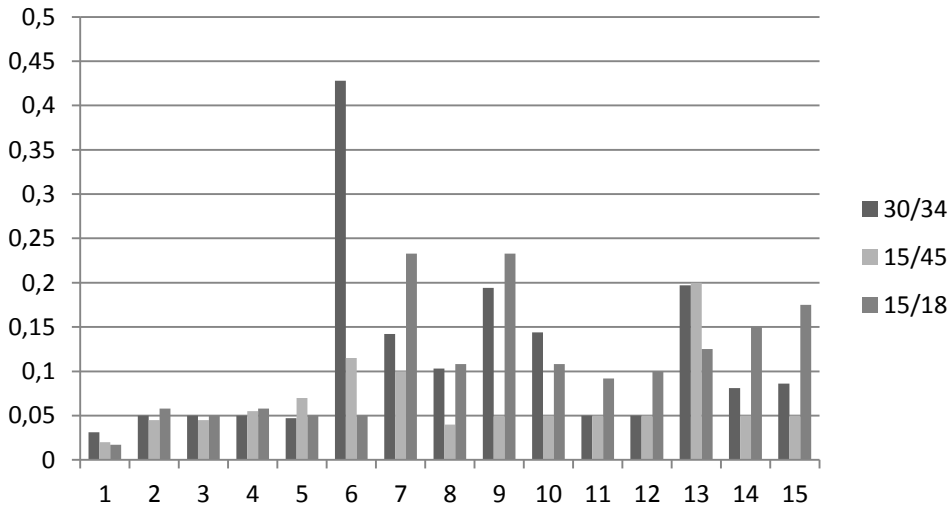
Vert. Temp.diff. Under dörr, vägdon



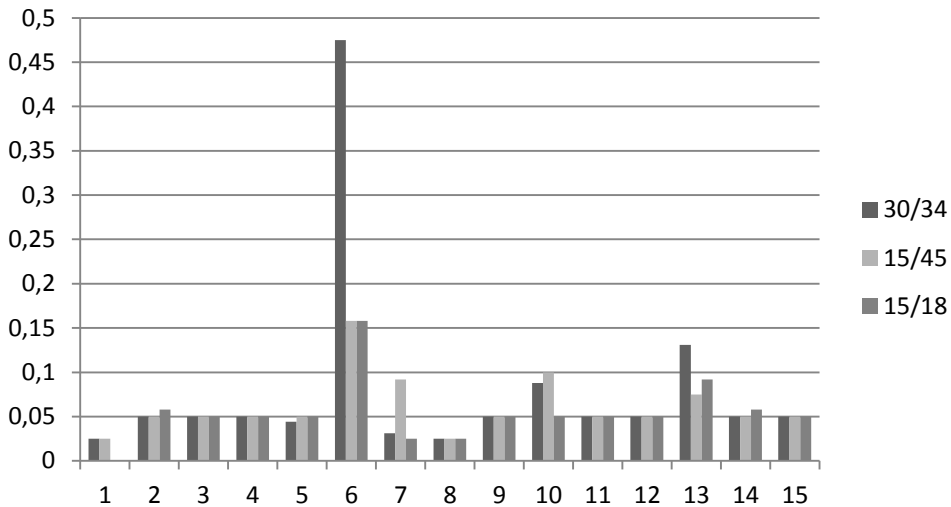
Vert. Temp.diff. Under dörr, takdon



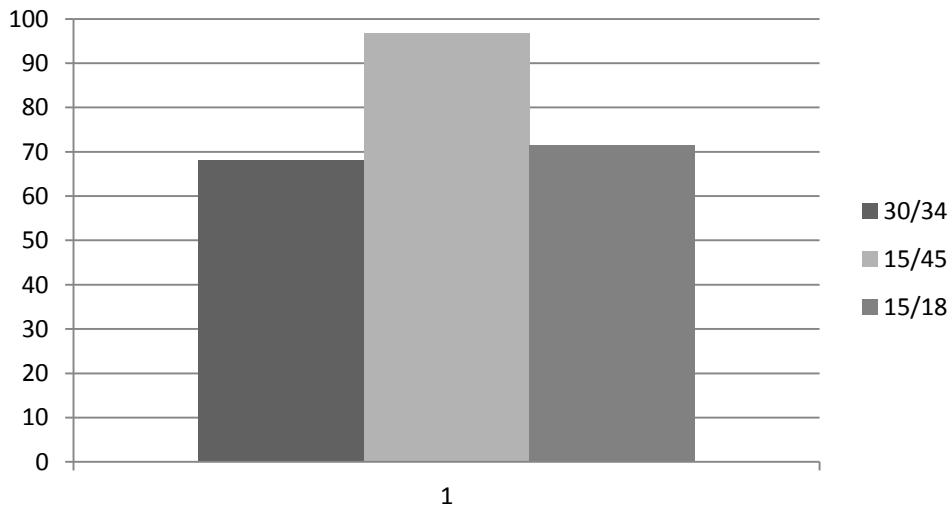
Hastighet med väggdon, evakuering under dörr



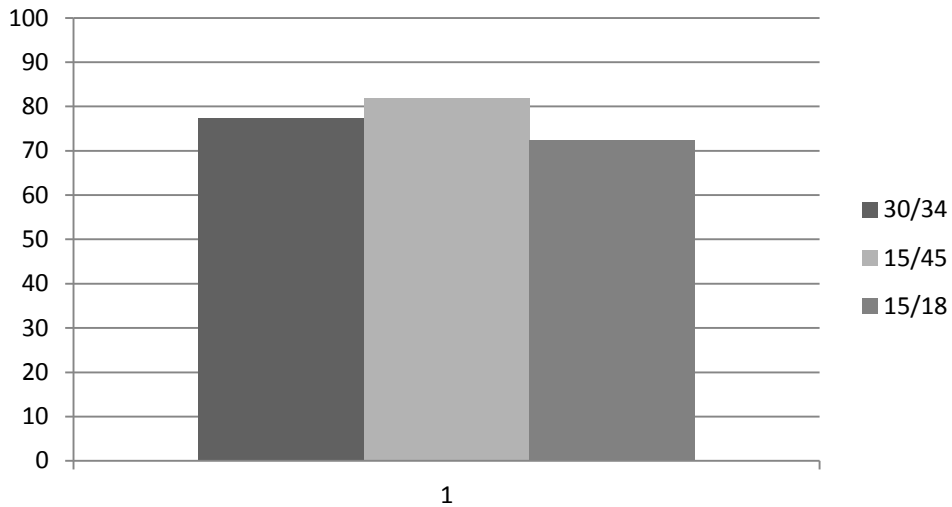
Hastighet med takdon, evakuering under dörr



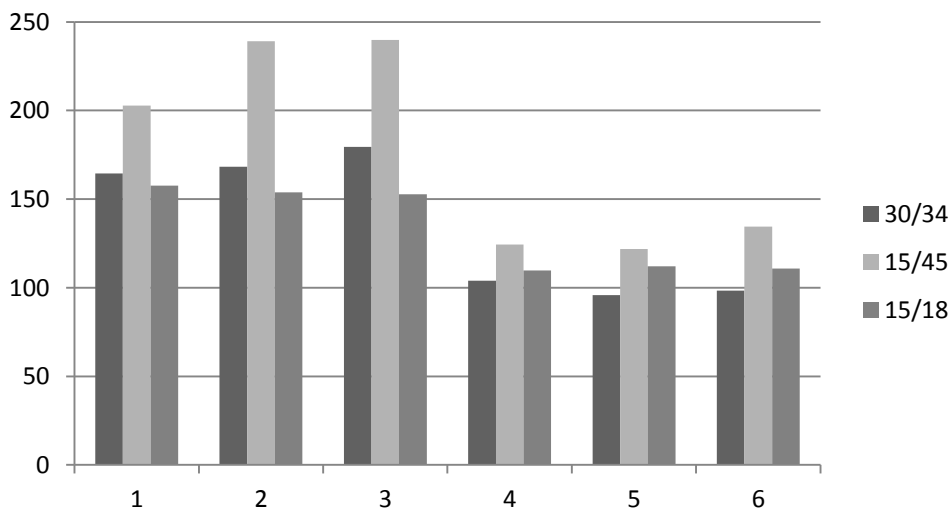
L.eff. Med väggdon, evakuering under dörr



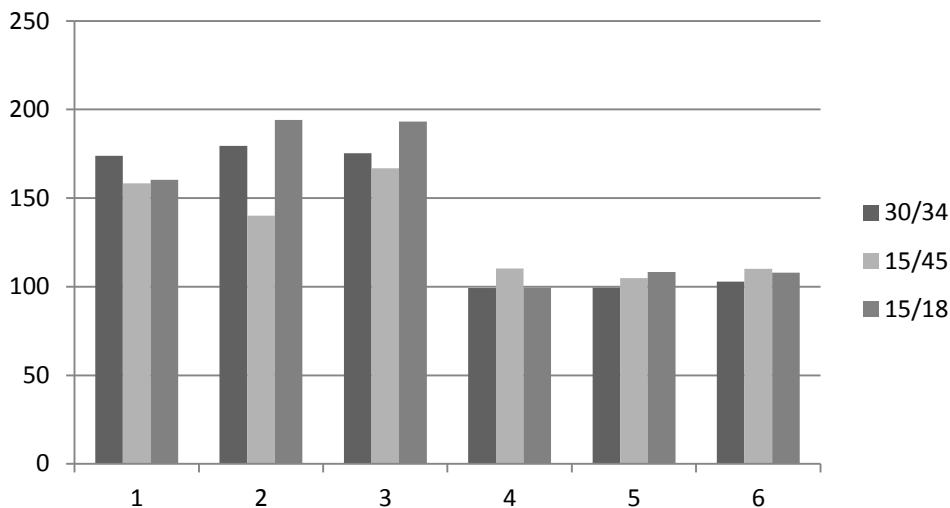
L.eff. Med takdon, evakuering under dörr



Lokalt index med väggdon, evakuering under dörr



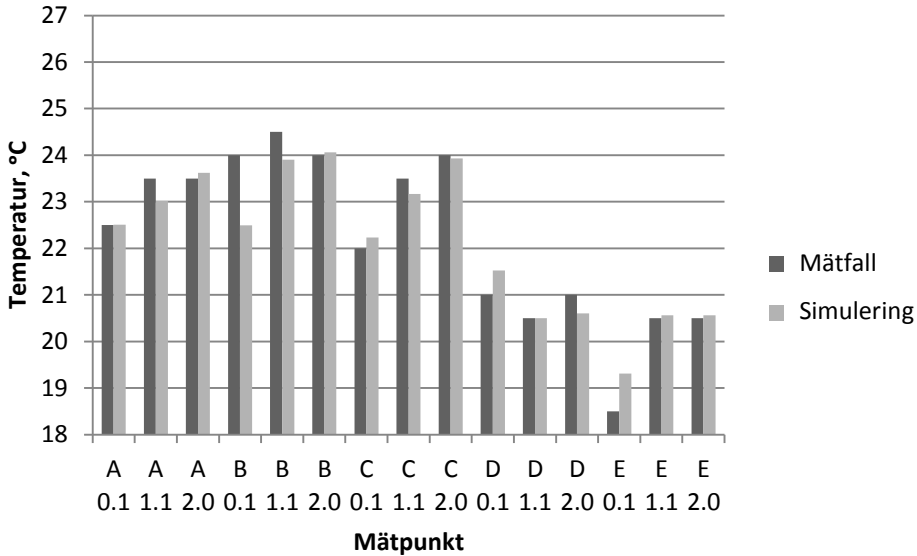
Lokalt index med takdon, evakuering under dörr



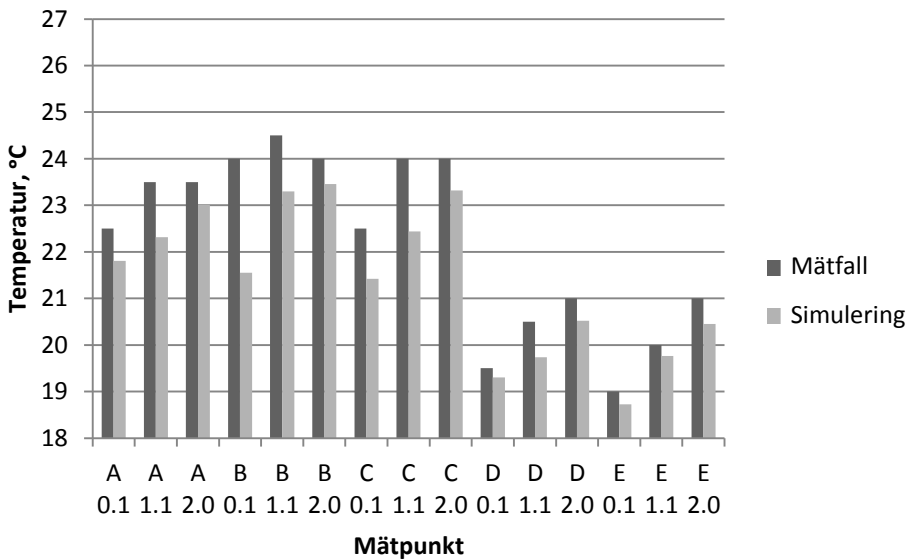
Bilaga D Jämförelse av mätning och simulering av lilla modellen

D.1 Lufttemperatur

Mätfall 1

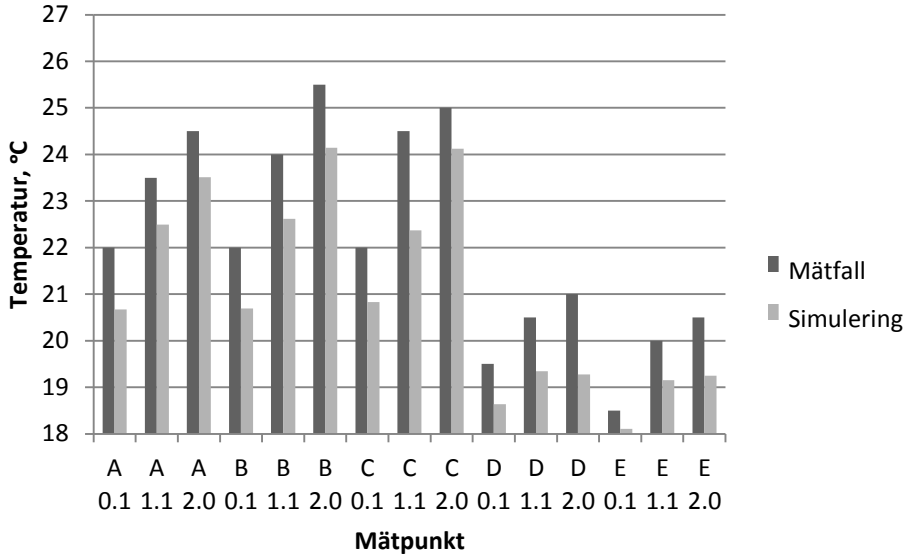


Mätfall 2

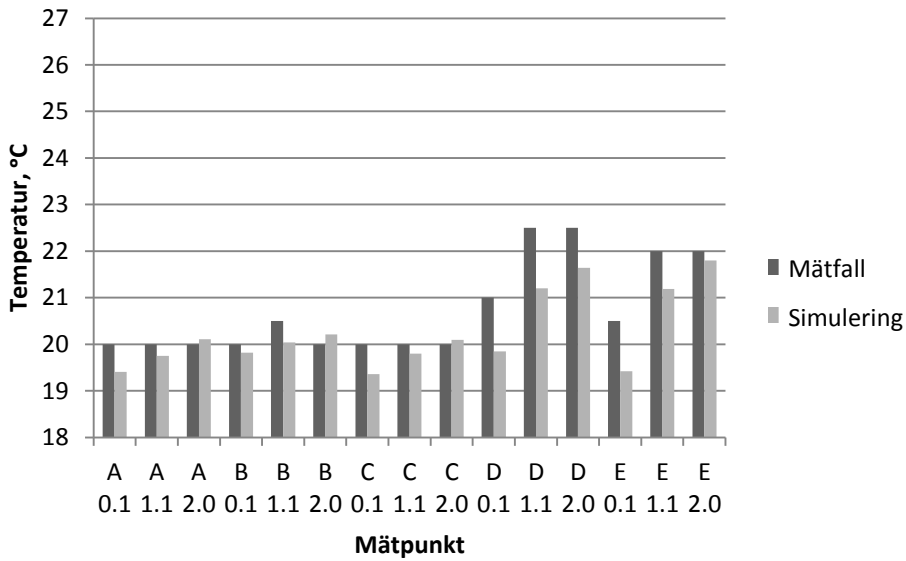


Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 3

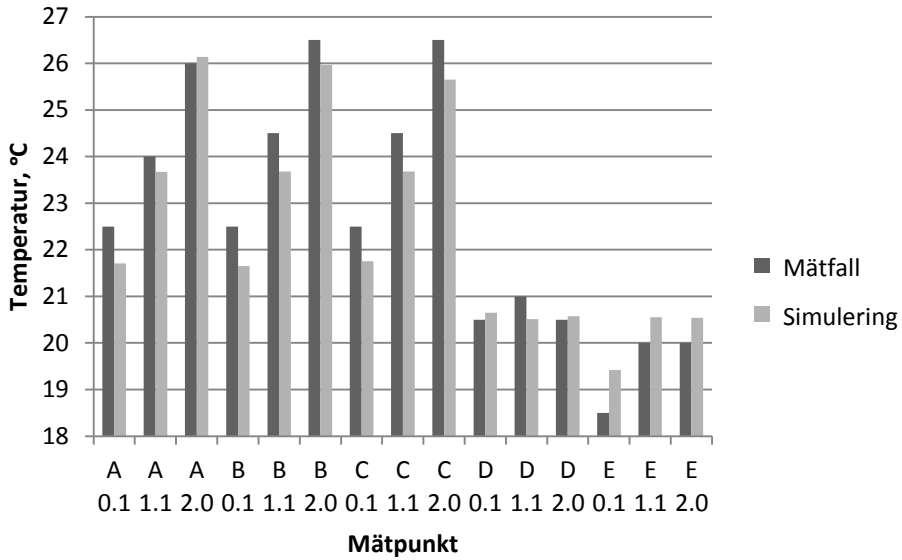


Mätfall 4

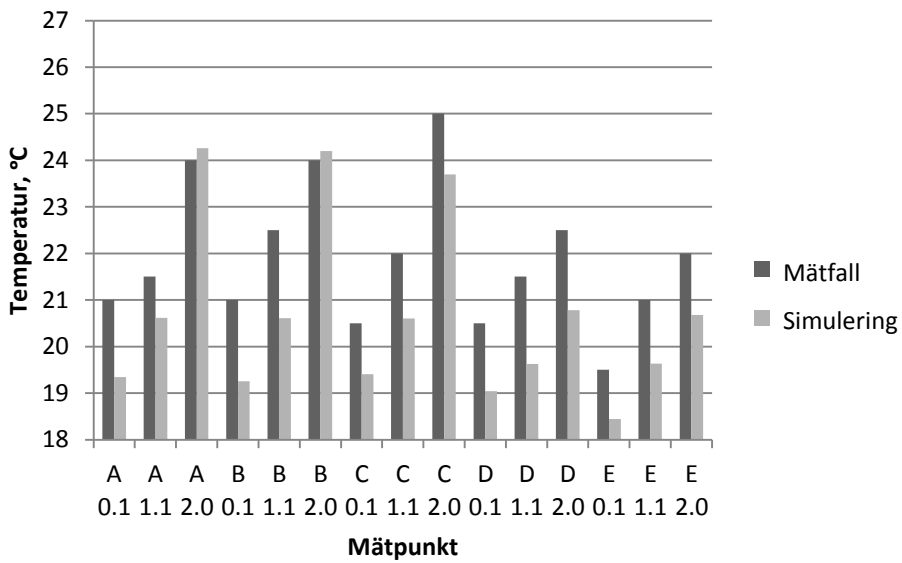


Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 5

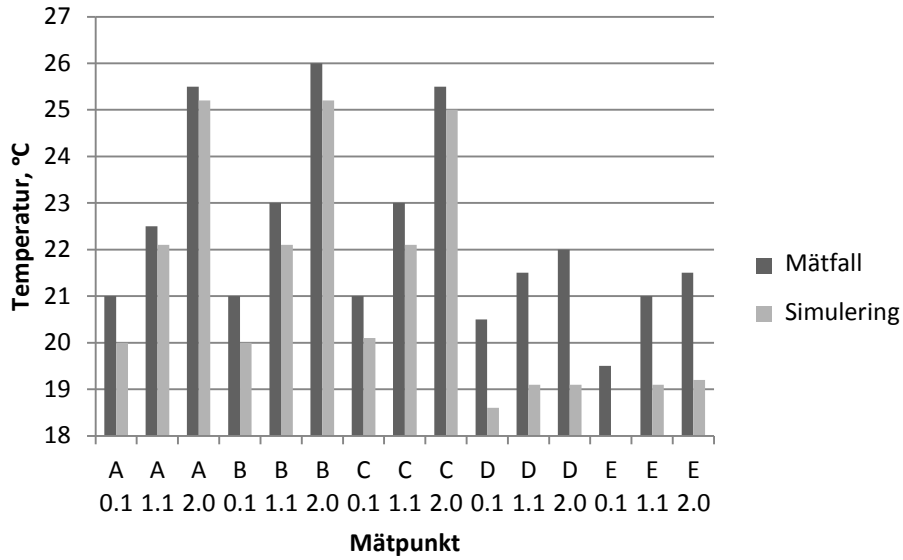


Mätfall 6

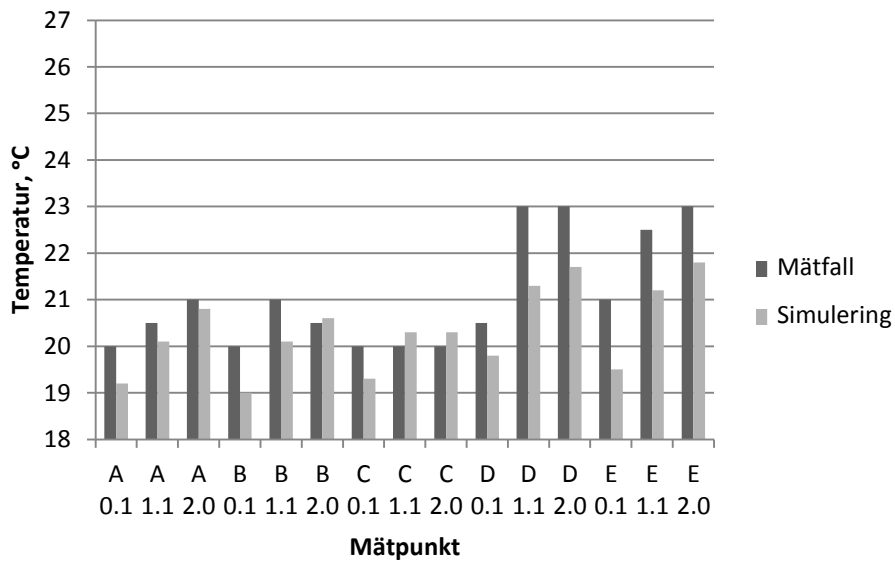


Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 7

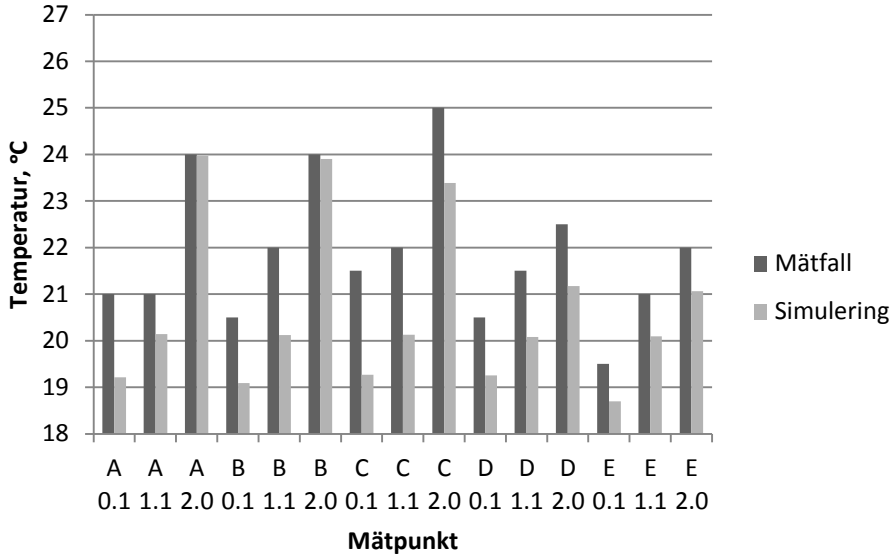


Mätfall 8

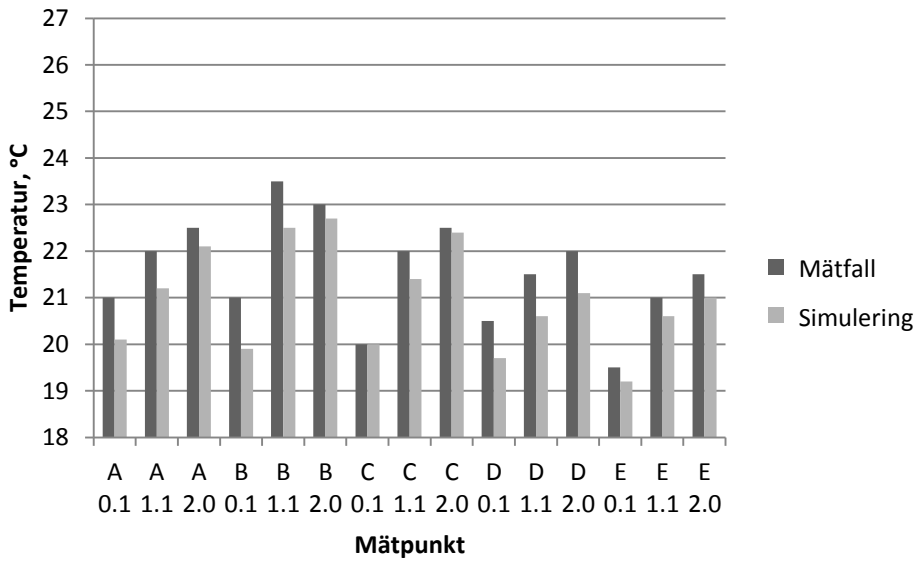


Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 9

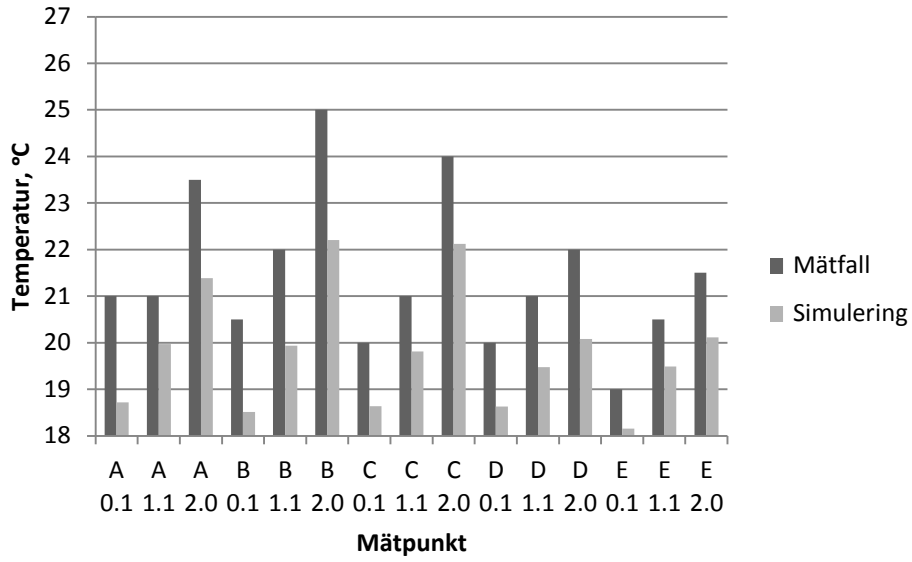


Mätfall 10



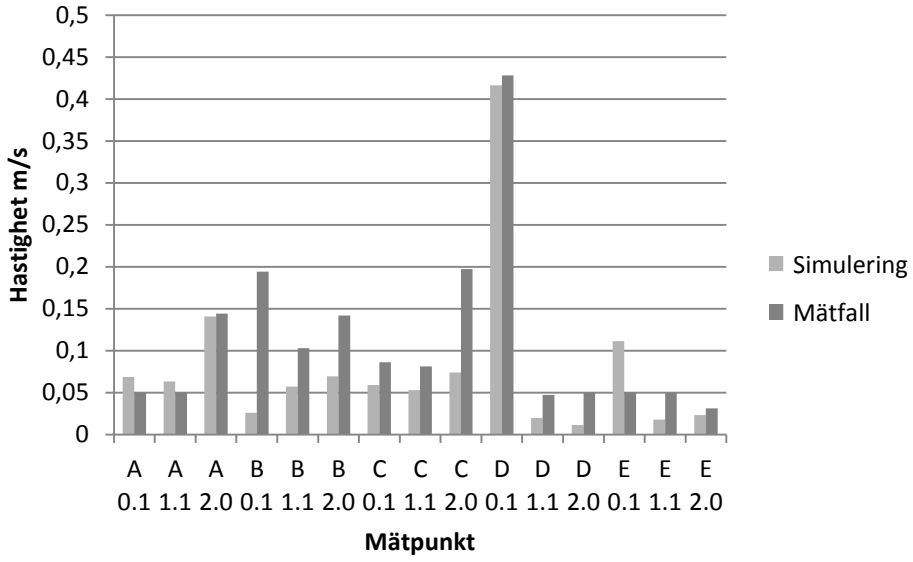
Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 11

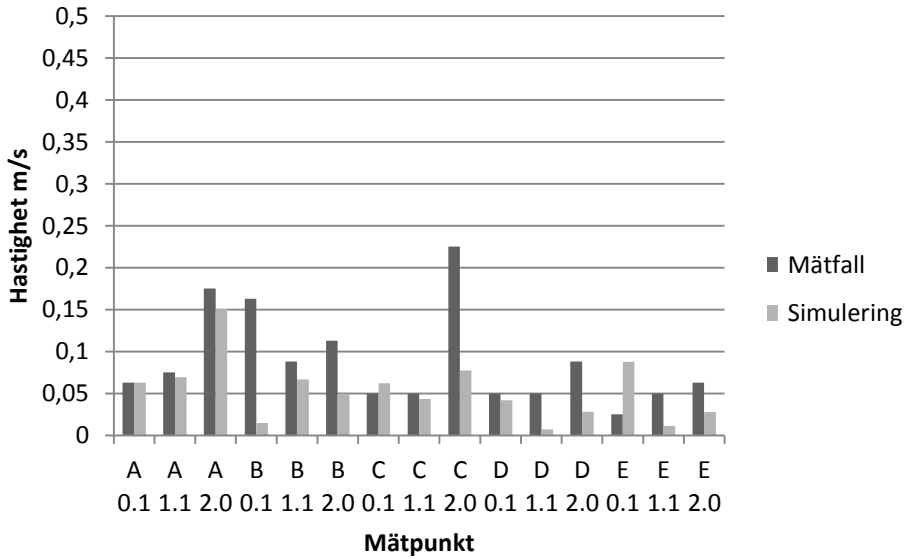


D.2 Lufthastighet

Mätfall 1

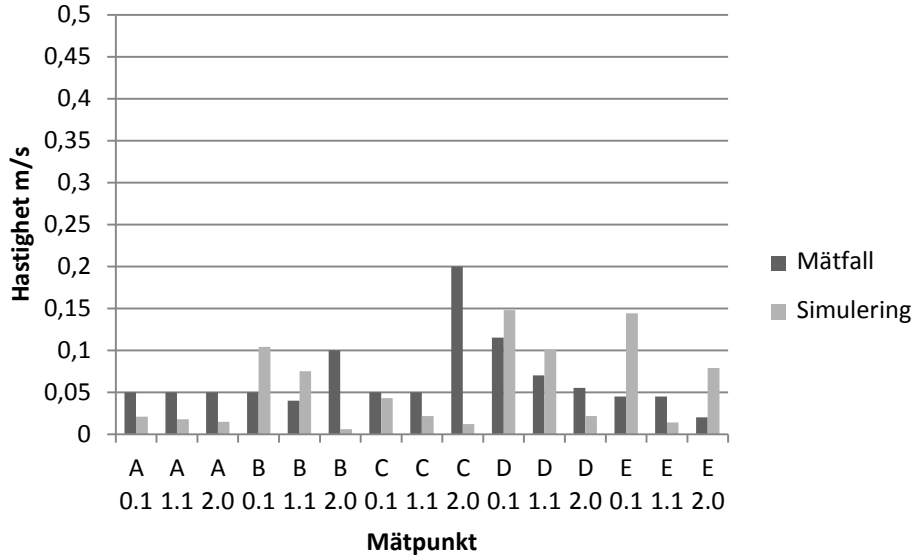


Mätfall 2

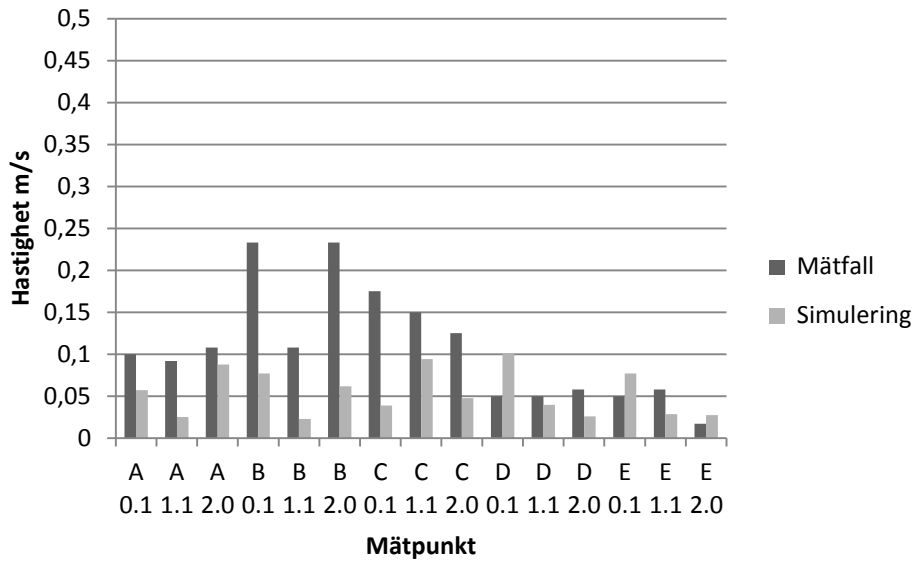


Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 3

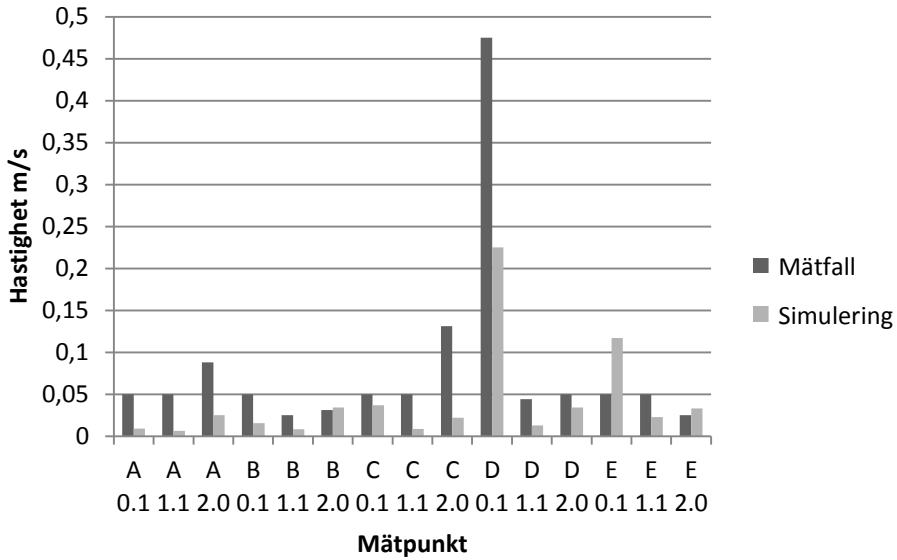


Mätfall 4

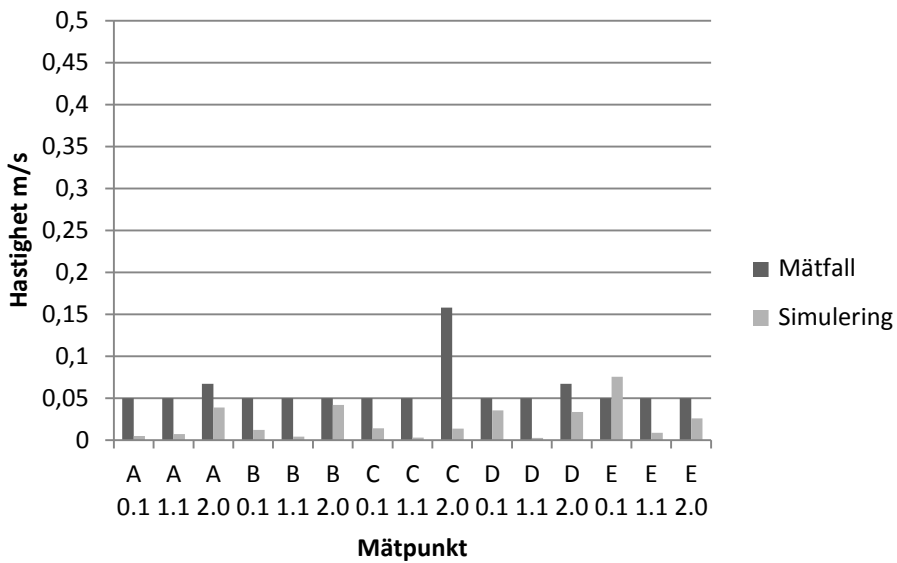


Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 5

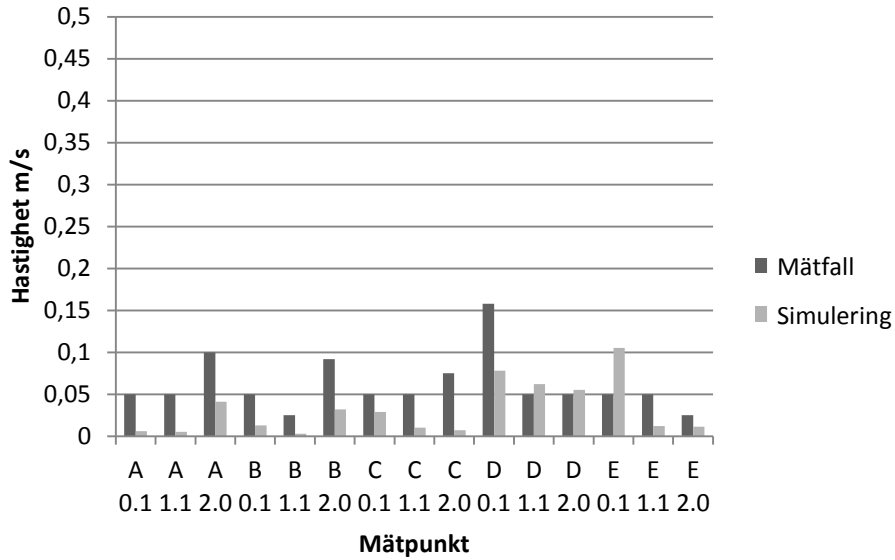


Mätfall 6

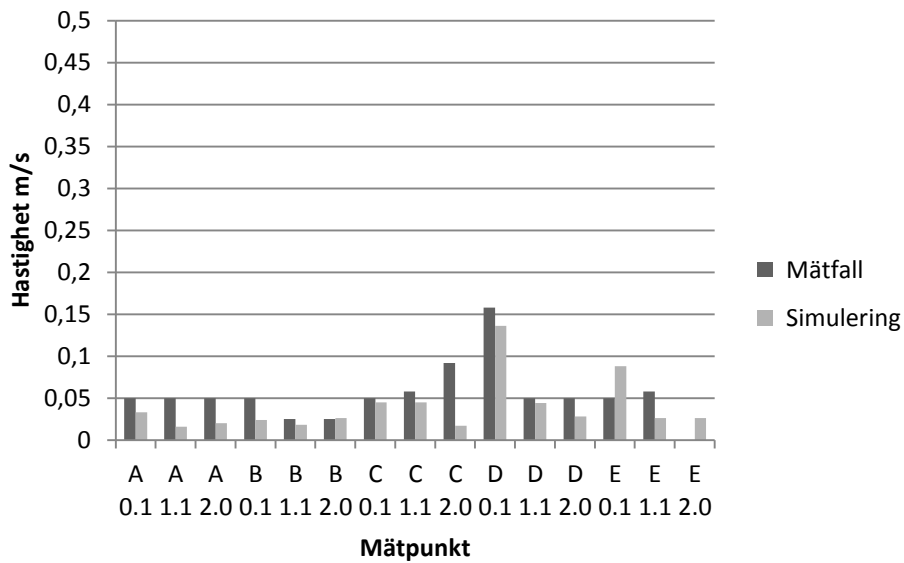


Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 7

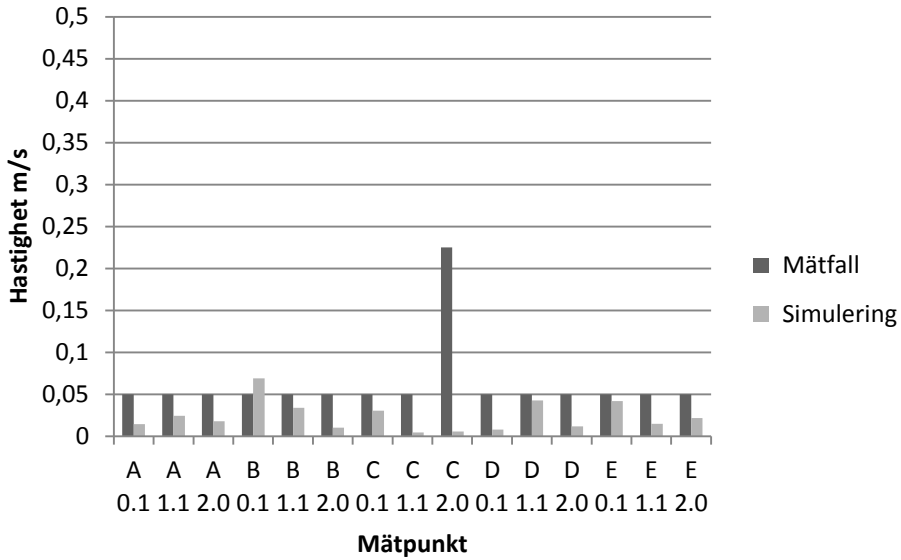


Mätfall 8

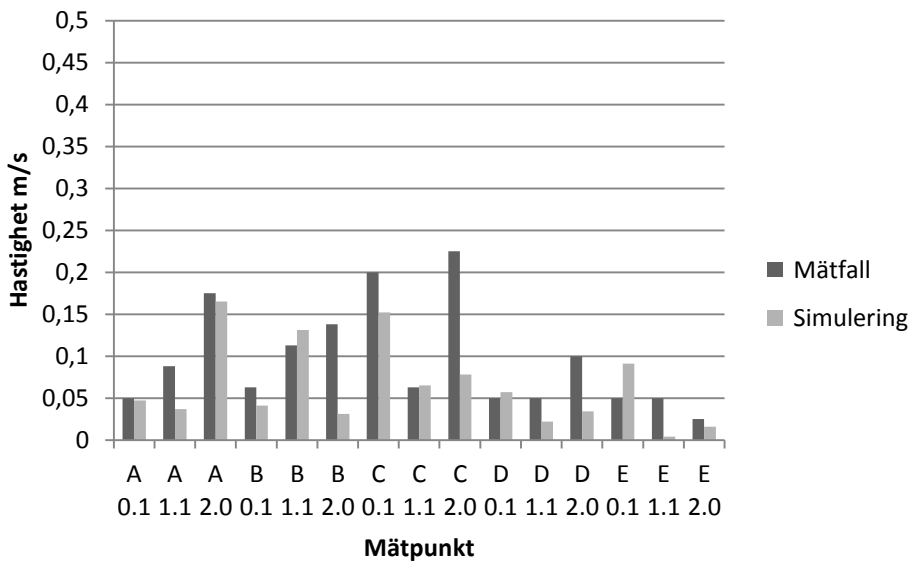


Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 9

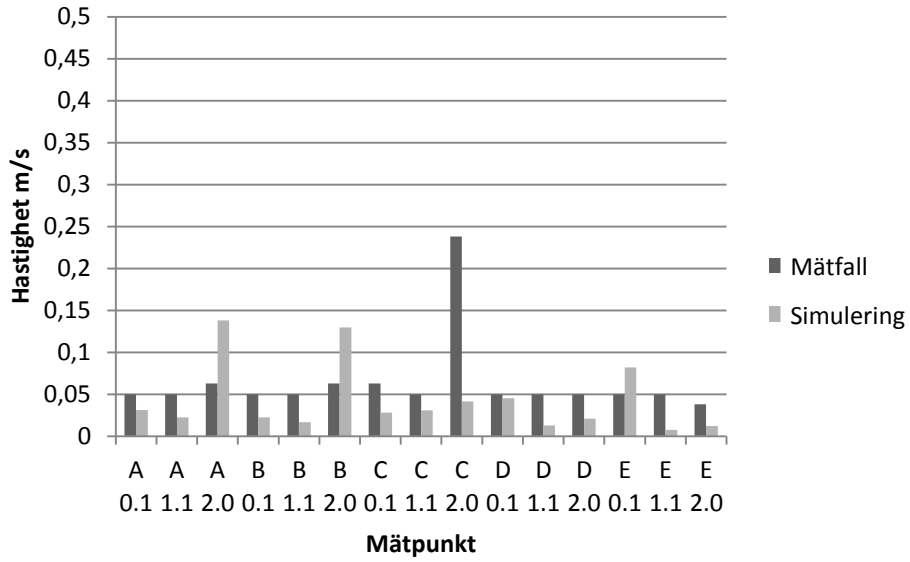


Mätfall 10



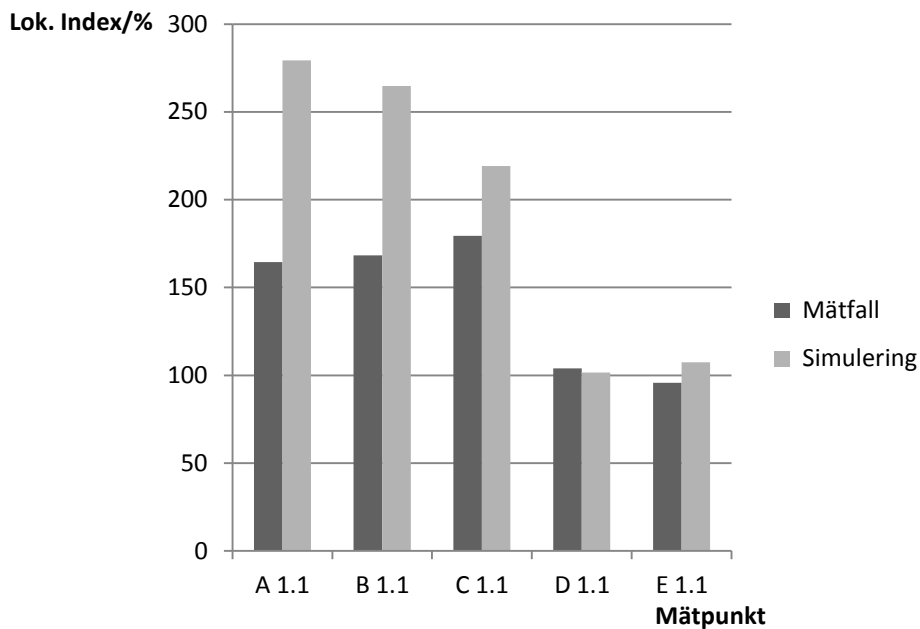
Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 11

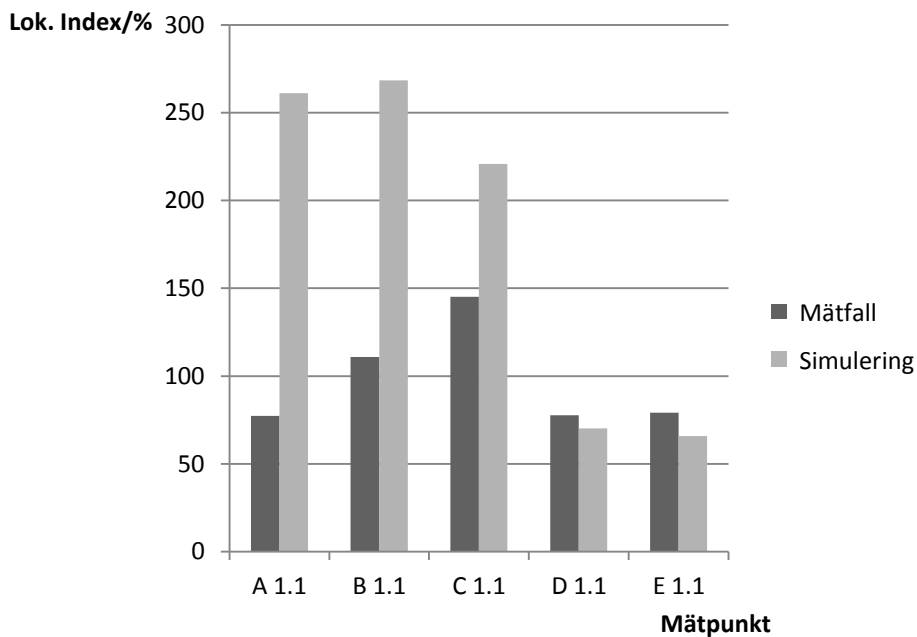


D.3 Lokalt ventilationsindex

Mätfall 1

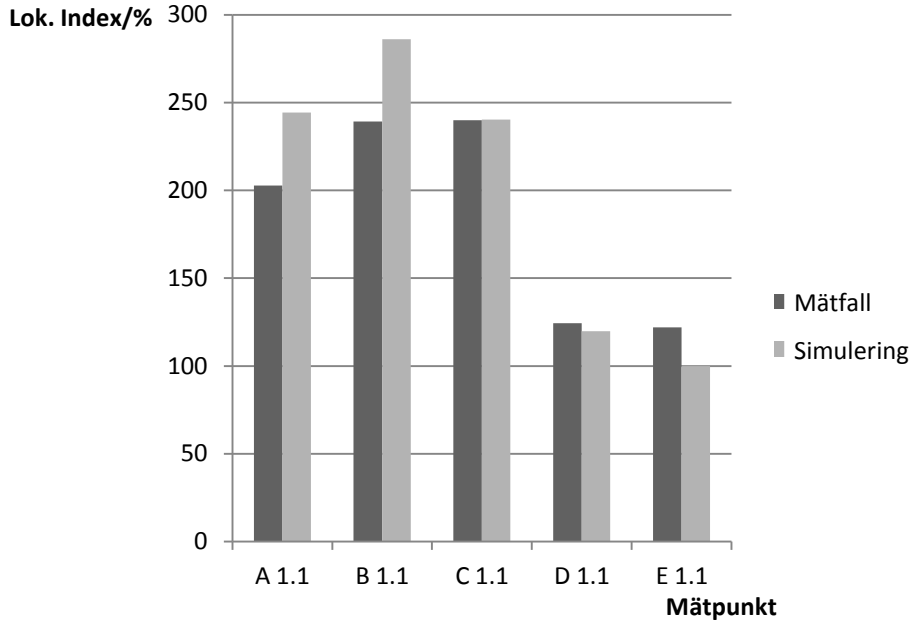


Mätfall 2

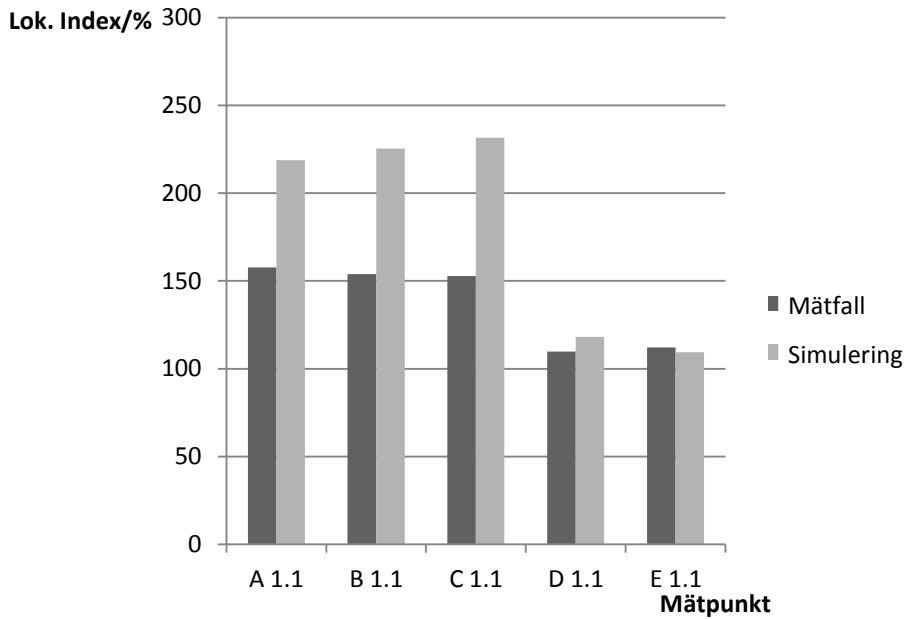


Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 3

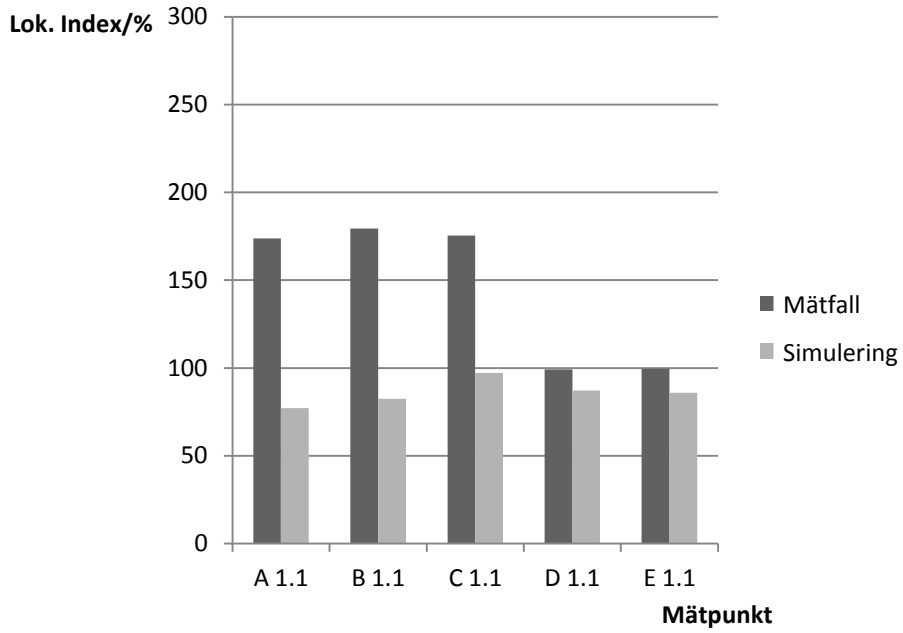


Mätfall 4



Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 5

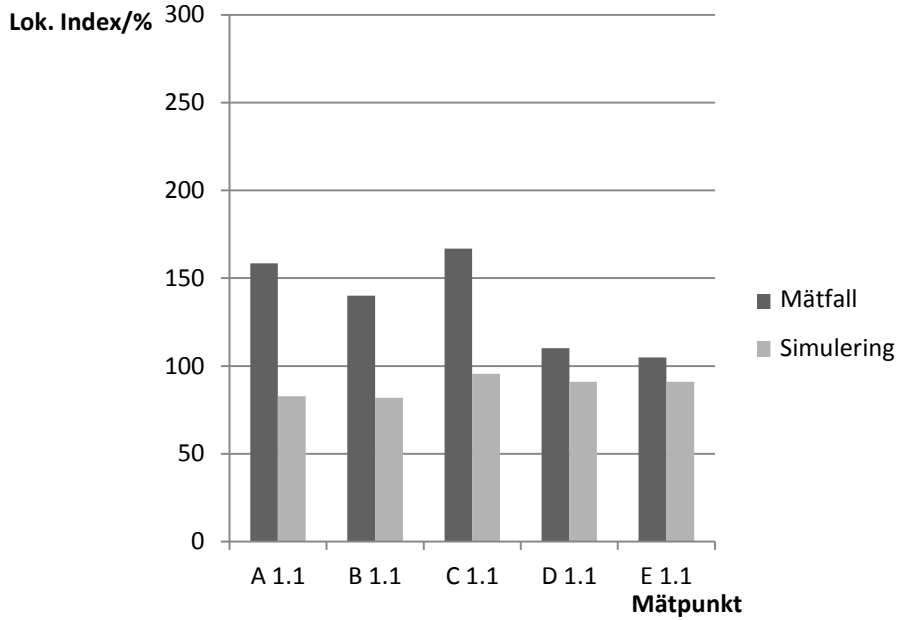


Mätfall 6

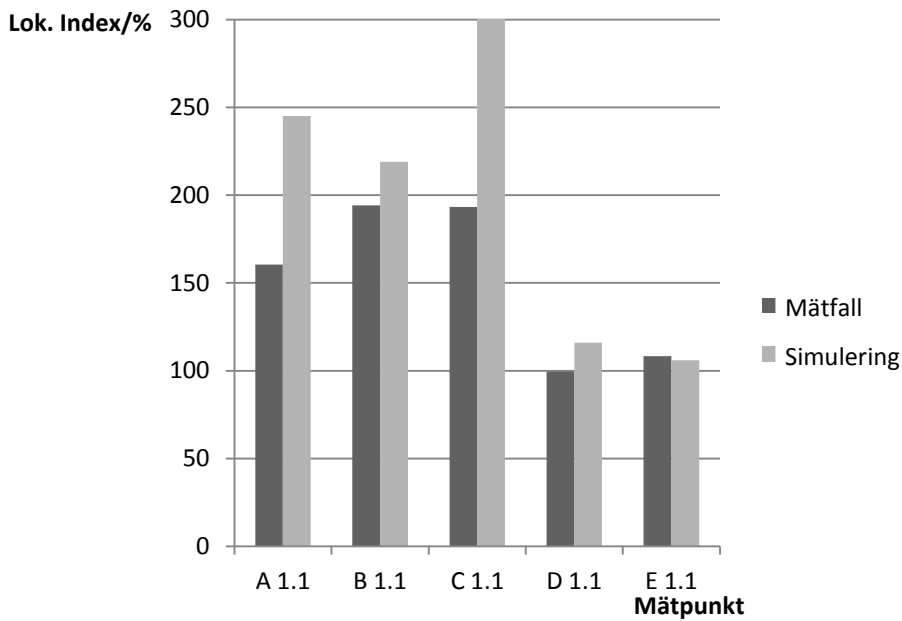
Fel i FloVENT, inga resultat.

Luftvärme i lågenergihus

Mätfall 7



Mätfall 8

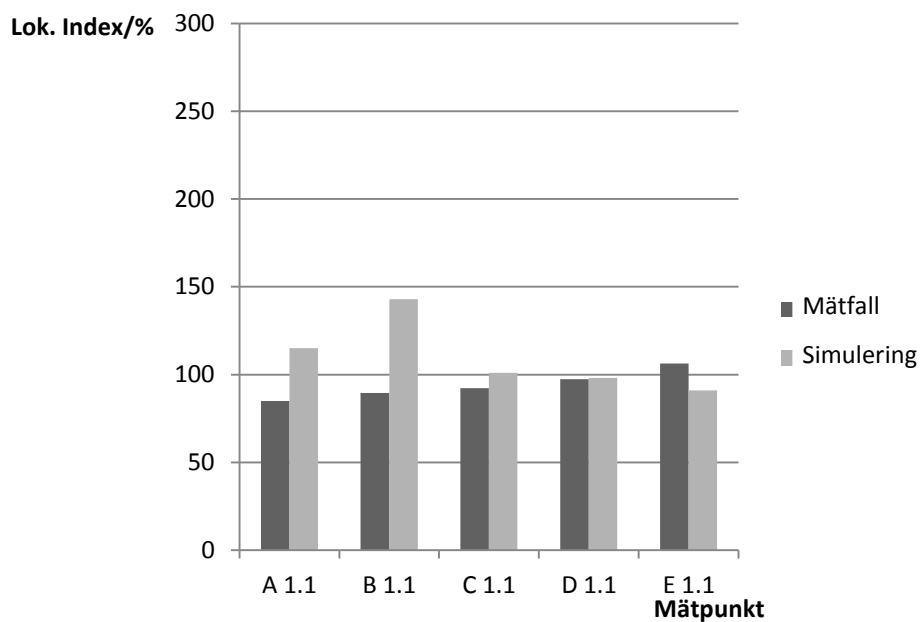


Luftvärme i lågenergihus

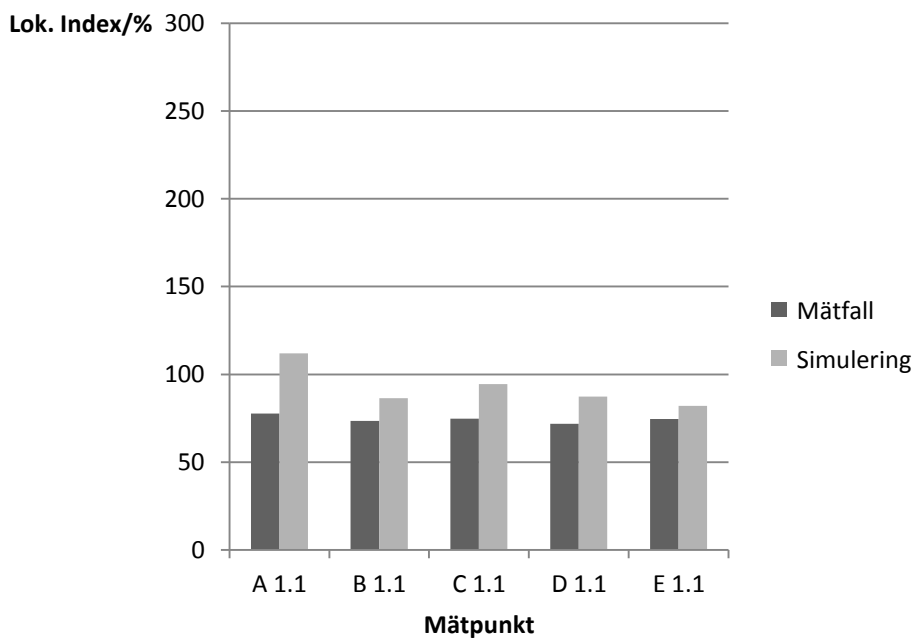
Mätfall 9

Fel i FloVENT, inga resultat.

Mätfall 10



Mätfall 11



Bilaga E Simulering stora lägenheten**E.1 Medelstrålningstemperatur**

Sim	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A 0.1	21,4	21,8	21,6	22	22,3	22,1	22,9	22,7	22,7
A 1.1	21,5	21,7	21,7	22	22,4	22,3	22,8	22,6	22,6
A 2.0	22,2	22,4	22,3	22,9	23,3	23,2	22,8	22,5	22,5
B 0.1	21,4	22,1	21,4	21,3	21,6	21,5	22,8	22,5	22,5
B 1.1	21,5	22	21,7	22,1	22,5	22,4	22,8	22,5	22,5
B 2.0	21,8	22,2	21,9	22,7	23	22,9	22,7	22,5	22,5
C 0.1	21,8	22	22	22,2	22,5	22,4	22,8	22,6	22,6
C 1.1	22,1	22,3	22,2	22,5	22,8	22,7	22,8	22,6	22,6
C 2.9	22,6	22,8	22,7	23,1	23,4	23,2	22,8	22,6	22,6
D 0.1	21,6	21,7	21,7	22,3	22,3	22,3	22,9	22,9	23
D 1.1	21,8	21,8	21,8	22,4	22,4	22,4	23	23	23,1
D 2.0	21,8	21,9	21,9	22,5	22,5	22,5	23,1	23,1	23,1
E 0.1	21,3	21,2	21,2	21,9	21,6	21,8	23	23	23
E 1.1	21,1	21	21,1	21,7	21,2	21,7	23,3	23,3	23,4
E 2.0	21,4	21,4	21,4	22,1	21,7	22	23,4	23,4	23,4
G 0.1	21,5	21,7	21,6	22,2	22,1	22,1	22,9	22,9	22,9
G 1.1	22,1	22,3	22,2	22,8	22,7	22,8	23	23	23
G 2.0	22,5	22,5	22,5	23,4	23,3	23,3	23	23	23
H 0.1	21,7	21,7	21,7	22,2	22,3	22,3	22,9	22,9	22,9
H 1.1	21,9	22	22	22,6	22,6	22,6	22,9	22,9	23
H 2.0	22,4	22,4	22,4	23,2	23,1	23,2	23	23	23
I 0.1	21,7	21,8	21,7	22,3	22,3	22,3	22,9	22,9	22,9
I 1.1	22	22	22	22,6	22,6	22,6	23	22,9	23
I 2.0	22,1	22,1	22,1	22,8	22,8	22,8	23	23	23

Luftvärme i lågenergihus

E.2 PMV och PPD

Sim	1		2		3		4		5	
Punkt	PMV	PPD	PMV	PPD	PMV	PPD	PMV	PPD	PMV	PPD
A 0.1	-0.59	12.3	-0.48	9.7	-0.49	10.0	-0.44	9.0	-0.29	6.8
A 1.1	-0.45	9.2	-0.36	7.7	-0.51	10.5	-0.30	6.9	-0.15	5.5
A 2.0	-0.46	9.4	-0.21	6.0	-0.41	8.5	-0.11	5.3	0.02	5.0
B 0.1	-0.49	10.1	-0.52	10.7	-0.48	9.8	-0.60	12.4	-0.48	9.8
B 1.1	-0.37	7.8	-0.35	7.5	-0.36	7.7	-0.24	6.2	-0.06	5.1
B 2.0	-0.28	6.7	-0.36	7.6	-0.26	6.4	-0.04	5.0	0.05	5.1
C 0.1	-0.53	10.8	-0.46	9.4	-0.46	9.4	-0.43	8.8	-0.30	6.8
C 1.1	-0.38	8.0	-0.44	9.0	-0.33	7.3	-0.24	6.2	-0.10	5.2
C 2.0	-0.22	6.0	-0.15	5.4	-0.24	6.2	-0.12	5.3	-0.02	5.0
D 0.1	-0.55	11.4	-0.56	11.6	-0.57	11.7	-0.40	8.3	-0.40	8.4
D 1.1	-0.45	9.2	-0.48	9.7	-0.47	9.6	-0.28	6.6	-0.31	7.0
D 2.0	-0.42	8.6	-0.44	9.0	-0.43	8.9	-0.24	6.2	-0.26	6.4
E 0.1	-0.71	15.7	-0.75	16.9	-0.72	15.8	-0.57	11.7	-0.59	12.3
E 1.1	-0.52	10.8	-0.57	11.8	-0.54	11.2	-0.35	7.6	-0.39	8.1
E 2.0	-0.45	9.3	-0.49	9.9	-0.47	9.5	-0.28	6.6	-0.31	7.0
G 0.1	-0.58	12.0	-0.58	12.1	-0.58	12.0	-0.41	8.6	-0.42	8.8
G 1.1	-0.38	8.0	-0.40	8.4	-0.37	7.9	-0.21	5.9	-0.23	6.1
G 2.0	-0.33	7.3	-0.33	7.3	-0.31	7.1	0.06	5.1	0.04	5.0
H 0.1	-0.57	11.7	-0.56	11.7	-0.57	11.8	-0.41	8.5	0.42	8.7
H 1.1	-0.42	8.7	-0.44	9.0	-0.43	8.8	-0.25	6.3	-0.27	6.5
H 2.0	-0.33	7.2	-0.34	7.4	-0.33	7.3	-0.11	5.3	-0.13	5.4
I 0.1	-0.55	11.2	-0.54	11.0	-0.55	11.3	-0.39	8.2	-0.39	8.2
I 1.1	-0.41	8.6	-0.43	8.8	-0.42	8.7	-0.24	6.2	-0.27	6.5
I 2.0	-0.40	8.4	-0.42	8.6	-0.40	8.4	-0.13	5.4	-0.15	5.5

Luftvärme i lågenergihus

Sim	6		7		8		9	
Punkt	PMV	PPD	PMV	PPD	PMV	PPD	PMV	PPD
A 0.1	-0.35	7.6	-0.35	7.5	-0.43	8.8	-0.42	8.7
A 1.1	-0.20	5.8	-0.35	7.6	-0.44	9.0	-0.44	8.9
A 2.0	-0.02	5.0	-0.36	7.7	-0.45	9.3	-0.45	9.2
B 0.1	-0.52	10.7	-0.47	9.5	-0.45	9.2	-0.45	9.1
B 1.1	-0.10	5.2	-0.51	10.5	-0.50	10.3	-0.62	13.0
B 2.0	0.02	5.0	-0.70	15.4	-0.75	16.9	-0.73	16.3
C 0.1	-0.35	7.5	-0.50	10.1	-0.52	10.6	-0.52	10.7
C 1.1	-0.14	5.4	-0.36	7.6	-0.45	9.3	-0.45	9.2
C 2.0	-0.04	5.0	-0.37	7.9	-0.45	9.2	-0.45	9.1
D 0.1	-0.41	8.5	-0.32	7.1	-0.32	7.1	-0.28	6.7
D 1.1	-0.30	6.8	-0.28	6.6	-0.25	6.3	-0.26	6.4
D 2.0	-0.25	6.3	-0.22	6.0	-0.19	5.8	-0.20	5.8
E 0.1	-0.58	12.1	-0.31	6.9	-0.29	6.8	-0.28	6.6
E 1.1	-0.38	7.9	-0.25	6.3	-0.22	6.0	-0.22	6.0
E 2.0	-0.30	6.8	-0.16	5.6	-0.14	5.4	-0.15	5.4
G 0.1	-0.42	8.7	-0.31	7.0	-0.30	6.8	-0.30	6.8
G 1.1	-0.22	6.0	-0.28	6.6	-0.26	6.4	-0.26	6.4
G 2.0	0.04	5.0	-0.35	7.5	-0.24	6.2	-0.24	6.2
H 0.1	-0.42	8.7	-0.31	7.1	-0.31	7.0	-0.31	7.0
H 1.1	-0.26	6.4	-0.30	6.9	-0.29	6.8	-0.29	6.8
H 2.0	-0.12	5.3	-0.29	6.7	-0.29	6.8	-0.30	6.8
I 0.1	-0.39	8.2	-0.30	6.9	-0.29	6.8	-0.29	6.7
I 1.1	-0.26	6.4	-0.29	6.7	-0.27	6.6	-0.27	6.6
I 2.0	-0.15	5.4	-0.27	6.5	-0.25	6.3	-0.25	6.3

Luftvärme i lågenergihus

E.3 Lokal medelålder

Sim	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A 0.1	2160	795	779	5000	1520	1980	3540	2930	2300
A 1.1	1400	779	712	5130	1440	1700	3560	2920	2270
A 2.0	1230	815	724	5000	1660	3500	3610	2900	2250
B 0.1	1040	698	689	4790	1530	1830	3050	2770	2160
B 1.1	1140	768	698	4260	1360	1540	3380	3020	2350
B 2.0	1280	687	776	4340	1380	1580	3300	2890	2280
C 0.1	2190	782	815	5100	1620	1920	3270	2850	2230
C 1.1	1890	614	825	4560	1360	1700	3450	3000	2350
C 2.0	1390	716	790	4450	1450	1640	3340	2780	2190
D 0.1	2390	2580	2470	4950	4450	4030	3620	4540	4870
D 1.1	2320	2000	2310	4860	4490	4020	3770	5240	4610
D 2.0	2030	2410	2260	4810	4330	4410	3980	5750	5720
E 0.1	2000	2480	2410	4760	4250	3860	3670	4260	5220
E 1.1	2160	2530	2340	4940	4480	4120	3780	5290	5120
E 2.0	1970	2450	2290	4980	4540	3820	3810	5290	4860
G 0.1	1530	1620	1880	4750	3930	3880	3000	4580	4630
G 1.1	2530	2240	2660	5260	4270	4290	3000	4550	4710
G 2.0	1640	1620	1820	4750	3820	3940	2990	4820	4880
H 0.1	1570	1730	2020	4780	3930	3890	2980	4560	4660
H 1.1	2450	2160	2660	5320	4200	4350	2930	4480	4600
H 2.0	2400	2270	2630	5360	4380	4380	3190	4780	4810
I 0.1	1760	2160	2580	5200	4720	4470	3010	4870	4860
I 1.1	2480	2400	2690	5320	4420	4400	3320	4750	4760
I 2.0	2210	2040	2390	4850	3960	3940	3200	5020	5010