

ElectriCity Indoors



Augusti 2018

Förord

Arbetet som redovisas i föreliggande rapport har utförts med medel från Chalmers Styrkeområde Energi. Projektet har genomförts vid Avdelningen för installationsteknik (Installationsteknik) som vid projektets start sorterade under Institutionen för Bygg- och Miljöteknik. Chalmers Industriteknik har medverkat genom CIT Energy Management AB.

Genomförandet har letts av Ass. Prof Lars Ekberg, CIT Energy Management, tillsammans med Prof. Jan-Olof Dalenbäck, Installationsteknik. Vid genomförandet av mätningarna har följande personer medverkat: Forskn. Ing. Håkan Larsson, Installationsteknik, Tekn. Lic. Tommy Sundström, CIT Energy Management och Adj. Prof. Sarka Langer, Installationsteknik/IVL Svenska Miljöinstitutet. Enkäter med bussresenärer genomfördes av Josep Termens, CIT Energy Management. Datorsimuleringar utfördes av Tek. Lic Daniel Olsson, CIT Energy Management/Installationsteknik.

För den händelse ytterligare inomhushållplatser planeras kan föreliggande rapport utgöra en värdefull samling erfarenheter.

Göteborg 2018-08-31,

Lars Ekberg

Innehåll

Förord	3
Innehåll	5
Sammanfattning av resultat	7
1. Bakgrund.....	9
2. Syfte och Mål	9
3. Metod.....	10
4. Hållplatsen	10
5. Klimatteknisk funktion	10
Luftutbyte	10
Temperaturhållning	10
Nyttiggörande av överskottsvärme från transformatorrum	14
6. Luftutbyte vid busspassager	15
7. Uppmätt termiskt klimat	17
Inverkan av kall buss vintertid	17
Termiskt klimat vid varmt sommarväder	18
8. Upplevd termisk komfort	20
9. Luftkvalitet.....	24
Koldioxidmätningar.....	24
Partiklar	27
10. Datorsimuleringar	31
Ovanligt snabba och påverkande händelser	31
Övergripande om modellen och dess interna värmelaster	32
Café och kök.....	32
Passage	32
Hållplats.....	32
Övergripande om modellens klimathållningssystem.....	34
Café, kök och passage	34
Hållplats.....	35
Känslighetsanalys för eventuell reception	37
Takpaneler värmda av el eller vatten?	37
Simuleringsmetod	38

Resultat – kalibrering av modellen	39
Resultat – komfort i öppen reception.....	43
11. Resultat – energi	48
Rimlighetsbedömning och jämförelse med uppmätt fjärrvärmeanvändning	48
12. Slutsatser	49
13. Idéer till alternativ hållplatsutformning	50
BILAGOR	51
Bilaga 1. Mätinstrument	53
Bilaga 2. Mall för intervjuer/enkät	55
Bilaga 3. Urval av indata för hållplatsmodellen.....	59
Mått och U-värden.....	59
Internvärme.....	60
Internvärme från buss.....	61
Chassi.....	61
Motorvärme.....	61
Bussens AC-system.....	61
Personer i hållplats	61

Sammanfattning av resultat

Arbetet kan summeras med följande punkter:

- Börvärdet för inomhushållplatsens temperaturstyrning var under den första vintersäsongen genomgående högre än avsett; typiskt 23°C istället för 15°C. Skälet till detta har inte klarlagts.
- Intervjuerna med resenärerna visar att önskad temperatur varierar från 15°C och uppåt beroende på utetemperaturen.
- Under vintern 2015/16 identifierades ett fel på hållplatsens värmesystem. En av lufttridåernas gav ingen värmeeffekt vilket gav mycket låga temperaturer i inomhushållplatsen. Det var nödvändigt att komplettera med värmefläktar. Felet åtgärdades i mars 2016.
- Lufttridåernas styrpaneler monterades ursprungligen så högt upp att de i praktiken inte var åtkomliga. Detta gjorde det omöjligt för driftpersonalen att göra erforderliga kontroller och inställningar. I början av 2016 flyttades panelerna till en åtkomlig plats i avsett apparatskåp.
- Lösningen för luftburen återvinning av överskottsvärme från transformatorn för laddning av bussen byggdes om under februari-mars 2016. Efter ombyggnaden kylv laddutrustningen betydligt mer effektivt, vilket också innebär avsevärt bättre värmeåtervinning.
- Det är god överensstämmelse mellan resultaten från genomförda mätningar och modelleringar av inomhustemperaturen på hållplatsen.
- Kallstrålning från kalla invändiga ytor vintertid sänker den operativa temperaturen i liten utsträckning, och utgör således inget stort problem för den termiska komforten.
- Inte heller bussens kalla ytterytor i samband med att bussen kör in på hållplatsen vintertid tycks utgöra något stort komfortproblem
- Uppmätt koncentration av koldioxid (som andats ut av personer i lokalen) är typiskt något högre i vistelsezonen än i frånluften (som tas på en hög nivå över golvet och stiger). Detta är förväntat med tanke på den valda principen för luftinblåsning och med tanke på att tilluften periodvis har använts för att värma lokalen (tilluften har högre temperatur än rumsluften). Luften blandas emellertid om ganska kraftfullt i samband med bussens utpassage, vilket motverkar den observerade skiktningen av luften. Dessutom är luftflödet högt i förhållande till antalet personer som vistas på hållplatsen, vilket gör att det inte är fråga om något problem beträffande hållplatsluftens kvalitet.
- Varje busspassage (föregående buss kör ut och nästa buss kör in) medför ett luftutbyte på upp till två gånger bussens volym (hållplatsluft byts på mycket kort tid ut mot uteluft).
- När portarna öppnas vintertid, i samband med bussarnas in- och utpassager, sjunker temperaturen på hållplatsen. Ridåvärmarna körs då på hög värmeeffekt vilket gör att temperaturfallet blir mycket kortvarigt och det bedöms inte utgöra något stort komfortproblem.

- Det har hänt tämligen frekvent att båda portarna öppnas samtidigt. Detta bör förhindras vintertid eftersom temperaturfallet på hållplatsen kan blir stort och att risken för störande drag ökar markant.
- Vid ett flertal tillfällen har det observerats att porten för bussens utfart varit öppen 3-4 gånger så lång tid som nödvändigt. En orsak till detta har varit att det är ett gångstråk vid utfarten, där bussen tvingas stanna halvvägs ut på grund av fotgängare.
- Vid varm väderlek sommartid har det blivit varmt på hållplatsen varför portarna och dörrarna ställts upp. Det hade varit en god lösning att möjliggöra fönstervädning för att förkorta perioder med höga temperaturtoppar.
- Koncentrationen av luftburna partiklar har uppmätts vid olika tillfällen på hållplatsen. Resultatet tyder på att partikelkoncentrationen kan stiga i samband med bussarnas in och utpassage. Detta beror sannolikt på att sedimenterat damm kan virvla upp från golvet på grund av kraftiga luft rörelser orsakade av portarnas luft ridåer. Detta har observerats vid torrt och klart väder men inte vid blöta förhållanden då hållplatsens körbana varit fuktig.
- Busshållplatsen behöver tillföras stora mängder köpt fjärrvärme trots att överskottsvärmen från laddningstransformatorn avsevärt sänker energibehovet. Uppmätta värden på årsbasis saknas ännu så länge, men beräkningar visar att det handlar om ca 66 MWh/år.

1. Bakgrund

Som ett demonstrationsprojekt togs en ny elbusslinje i drift i Göteborg under 2015. Busslinjen går mellan Lindholmen Science Park och Johanneberg Science Park. En elbusslinje innebär en tyst och lokalt utsläppsfri kollektivtrafik. Bakom initiativet står Volvokoncernen, Energimyndigheten, Västra Götalandsregionen, Göteborgs Stad, Göteborg Energi, Västtrafik, Lindholmen Science Park och Johanneberg Science Park. Via styrkeområde Energi och projektet "Energi på Campus" (EPOC) finns också Chalmers teknisk högskola med bland aktörerna.

För resenärernas komfort har en inomhushållplats byggts vid ändhållplatsen på Chalmers Lindholmen. Inomhushållplatsen är knutpunkten mellan det mobila energisystemet i elbussen och det stationära energisystemet i byggnaden. På inomhushållplatsen laddas elbussen inför nästa tur. I projektet ElectriCity Indoors studeras hållplatsbyggnadens energianvändning och inomhusklimat. Projektet har genomförts vid Avdelningen för installationsteknik, Institutionen för Bygg- och Miljöteknik.

2. Syfte och Mål

Syftet med ElectriCity Indoors är att lära från aktuella systemlösningar och att med utgångspunkt i state-of-the-art teknik förbättra möjligheterna att finna optimerade systemlösningar för framtida inomhushållplatser. Målet är att identifiera metoder för att reducera de energibehov som uppstår på inomhushållplatsen. Randvillkoret är att skapa och bibehålla ett bra inomhusklimat i både vänthall och i bussen. Energianvändningen jämfört med alternativa lösningar har också studerats.

Centrala forskningsuppgifter är att:

- Klargöra lämpliga krav på inomhusklimatet i inomhusmiljöer avsedda som väntrum i kollektivtrafiken (som funktion av aktivitetsnivå, kläder, väder etc.)
- Validera existerande projekteringsverktyg för beräkning/simulering av inomhusklimat. Jämför simuleringsresultat med mätdata. Klargör beräkningarnas möjligheter och begränsningar.
- Utredda konsekvenserna av att styra inomhusklimatet med hänsyn till lufttemperaturen mätt i en enskild punkt i rummet. Kvantifiera effekten av att istället styra med hänsyn till operativ temperatur centralt i vistelsezonen.
- Granska den tekniska lösningen på inomhushållplatsen avseende värmeåtervinning från bussens laddstation.
- Föreslå idéer till alternativa tekniska lösningar.

3. Metod

Metoden bygger på en kombination av simuleringar och verifierande mätningar på plats i hållplatsbyggnaden. Dessutom har intervjuer genomförts med resenärerna för att samla in uppgifter om upplevelsen av det termiska klimatet på inomhushållplatsen. Generaliserbara resultat tas fram genom simuleringsstudier med beräkningsverktyg som verifierats mot mätresultat.

De använda mätinstrumenten beskrivs i Bilaga 1. Mallen för intervjuerna redovisas i Bilaga 2.

4. Hållplatsen

Inomhushållplatsen ger möjlighet för passagerarna att vänta helt skyddade från vädrets makter. Istället för att passagerarna går ut till bussen körs den in till de väntande passagerarna. Att bussen kör in i huset innebär att den tar med sig kyla på vintern och värme på sommaren. På vintern kan bussens utsida vara mycket kall vilket påverkar förutsättningarna för bra termisk komfort på hållplatsen. På sommaren avger bussens luftkonditioneringssystem stora mängder värme. Dessutom blir det ett stort luftutbyte - som i sin tur innebär en risk för att det känns dragigt - när bussen kör in och ut genom stora portar. Ungefär var tionde minut kommer alltså förhållandena på hållplatsen att förändras påtagligt.

5. Klimatteknisk funktion

Luftutbyte

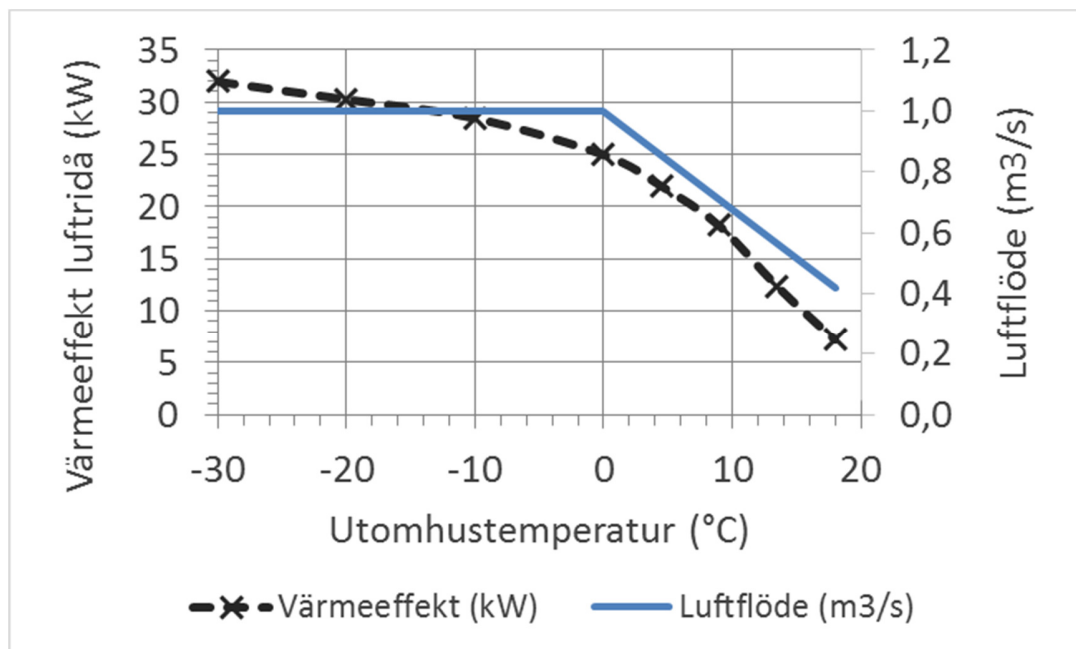
Hållplatsen ventileras med ett luftbehandlingsaggregat med roterande värmeåtervinnare och fjärrvärmeanslutet eftervärmningsbatteri. Aggregatet är i drift under den tid hållplatsen används. Både tillufts- och frånluftsflödet är då 250 l/s. Tilluften tillförs hållplatsen via en perforerad kanal monterad högt upp längs hållplatsens ena långsida.

Med avsikt att motverka alltför kraftigt luftutbyte mellan hållplatsen och det fria regleras de båda lufridåernas fläktar till högfartsläge då portarna öppnas.

Temperaturhållning

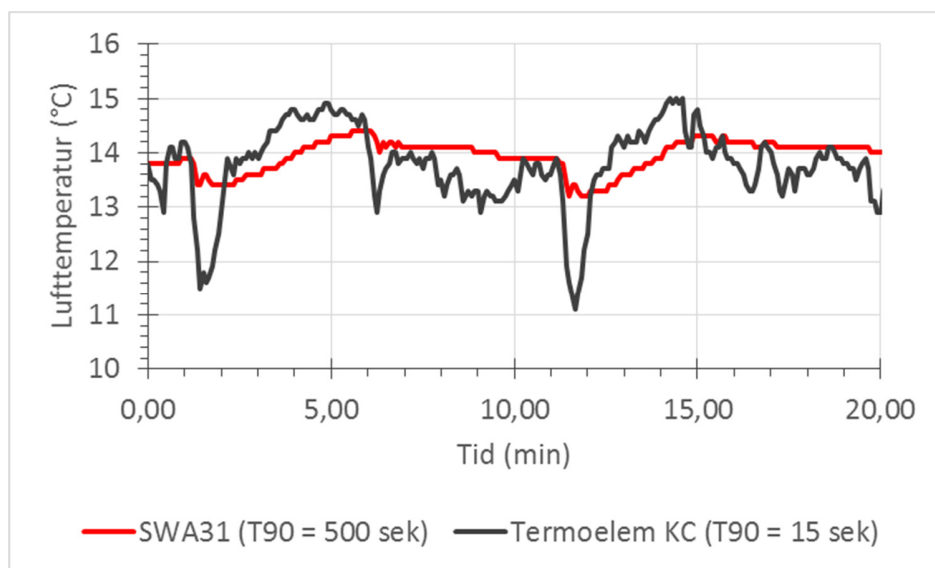
Hållplatsens båda portar är försedda med lufridåer med fjärrvärmeansluten luftvärmning med en maximal effekt på 32 kW vardera. Vintertid svarar dessa för den huvudsakliga uppvärmningen av hållplatsen. Enligt projekteringen ska lufridåernas värmningsfunktion styras mot att hålla hållplatsens lufttemperatur vid börvärdet 15°C. När portarna är stängda regleras lufridåernas fläktar till ett lågfartsläge. När portarna öppnas ökar luftflödet och lufridåernas avgivna värmeeffekt regleras enligt en

funktion av utomhustemperaturen, se Figur 5.1. Börsvärdet för hållplatsens lufttemperatur höjs samtidigt med 3°C.



Figur 5.1 Luftridåernas värmeeffekt och luftflöde som funktion av utomhustemperaturen. Luftens temperaturökning över luftridån uppgår till ca 14°C vid utomhustemperaturen +18°C, och ca 27°C vid utomhustemperaturen -30°C.

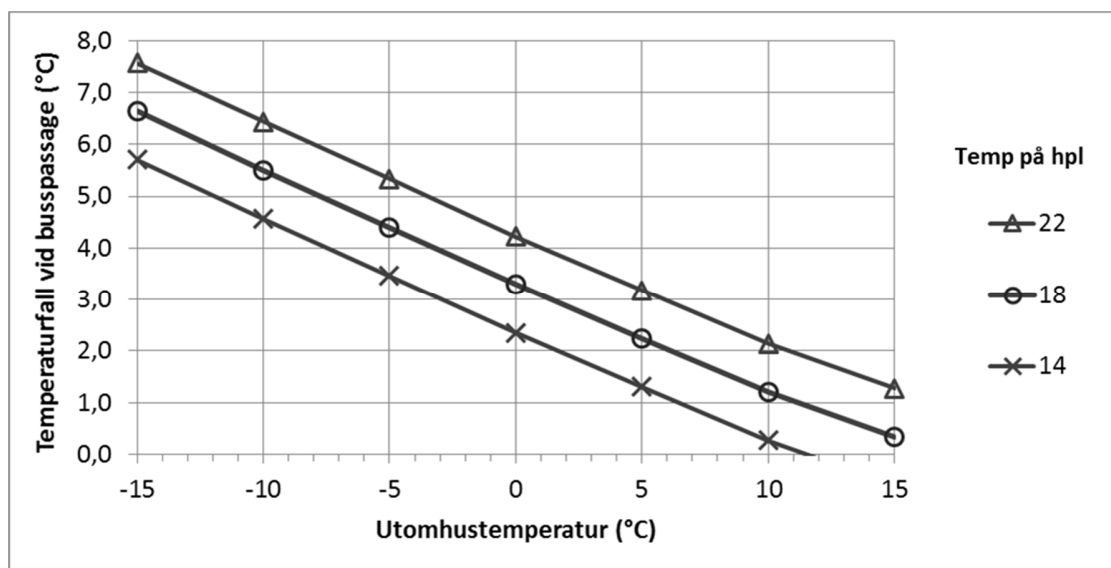
Det luftutbyte som uppstår i samband med busspassager medför att temperaturen på hållplatsen kommer att sjunka kortvarigt, vilket illustreras med mätvärden i Figur 5.2. Dels redovisas en mätning med ett mycket snabbt temperaturinstrument – ett termoelement med tidskonstanten, $T_{90} = 15$ sek. Dessutom redovisas resultatet från en samtidig mätning med ett instrument med en tidskonstant på 500 sek. Resultatet visar att temperaturfallet uppgår till flera grader (vid ca +1 °C utomhus), men att det är så kortvarigt att det är svårt att mäta om man inte använder ett mycket snabbt mätinstrument. Temperaturfallet är klart förnimbart men torde inte upplevas som speciellt obehagligt.



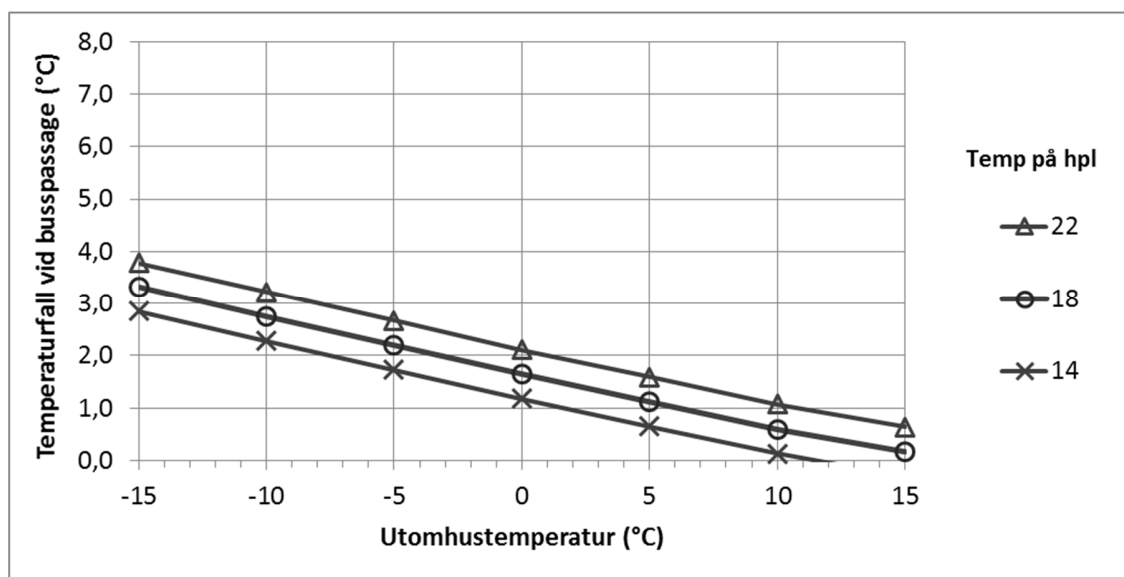
Figur 5.2 Temperaturfall i samband med busspassager uppmätt med två instrument med olika tröghet. Utomhustemperaturen var vid mättillfället ca +1,0°C.

I Figur 5.3 och Figur 5.4 redovisas en teoretisk beräkning av temperaturfallet som funktion av temperaturen utomhus och temperaturen på hållplatsluften. Vid beräkningen har antagits att luftutbytet med det fria uppgår till 160 m³ per busspassage - en siffra som bestämts med hjälp av spårgasmätningar (redovisas i avsnitt 6). Figur 5.3 avser en hållplats med en inre fri luftvolym på 685 m³, vilket i stort sett motsvarar den aktuella inomhushållplatsen på Lindholmen. Vid en plusgrad ute och 14 °C inne beräknas temperaturfallet genom värmebalans bli ca 2,5 °C, vilket stämmer väl med det mätresultat som redovisas i Figur 5.2 för den snabba givaren.

I Figur 5.4 redovisas resultatet från motsvarande men för en hållplats med dubbelt så stor inre fri volym, d v s 1 370 m³.



Figur 5.3 Beräknat temperaturfall i samband med busspassager för den aktuella hållplatsens inre fria volymen på ca 685 m³. Luftridåer i drift med effekt enligt Figur 5.1.



Figur 5.4 Temperaturfall i samband med busspassager beräknat för en hållplats med den inre fria volymen 1370 m³ (dubbelt så stor som hållplatsen på Teknikgatan). Luftridåer i drift med effekt enligt Figur 5.1.

Nyttiggörande av överskottsvärme från transformatorrum

Transformator och annan utrustning för laddning av elbussarna är belägna i husets källare. Värmeöverskott från denna utrustning ventileras bort med ett särskilt fläktaggregat. Enligt projekteringen är börvärdet för temperaturen i transformatorrummet 25°C. Vid ökande kylbehov i transformatorrummet regleras varvtalet på den aktuella fläkten upp till maximalt 600 l/s. När det råder värmebehov på inomhushållplatsen regleras ett spjällarrangemang så att den varma luften från transformatorrummet utnyttjas på hållplatsen genom att luft cirkulerar mellan transformatorrummet och hållplatsen. När det inte råder värmebehov på hållplatsen cirkulerar luften istället mellan transformatorrummet och det fria.

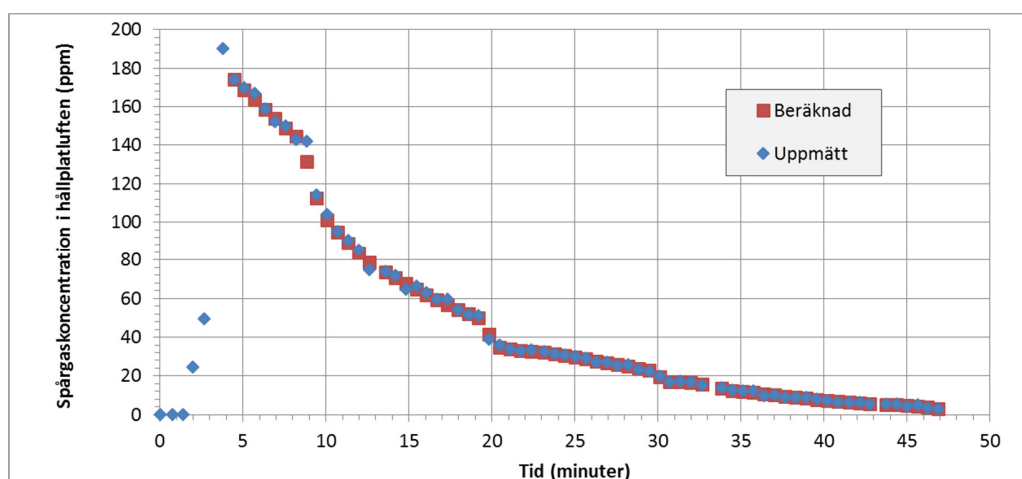
Det finns en projekterad vädringsfunktion som ska hålla hållplatsens båda dörrar öppna vid hög lufttemperatur på inomhushållplatsen.

6. Luftutbyte vid busspassager

Spårgasteknik har utnyttjats för att studera luftutbytet i samband med bussarnas in och utpassager. Som spårgas användes dinitrogenoxid. Detta är en vanlig gas för ändamålet och den doserades från en trycksatt flaska och mättes med en gasanalysator av fabrikat Brüel & Kjaer 1302. Spårgasen doserades och blandades med hållplatsluften med hjälp av två omblandningsfläktar. Dessa stoppades varpå spårgaskoncentrationen mättes i en centralt belägen punkt i hållplatsen. Därigenom studerades hur spårgasens koncentration klingade av med tiden, se Figur 6.1.

En balansekvation för spårgasen ställdes upp under antagandet att spårgasen var fullständigt omblandad i rumsluften. Med ledning av de uppmätta värdena kunde den tillförda luftvolymen bestämmas för varje tidssteg genom att minimera skillnaderna mellan uppmätt och beräknat resultat.

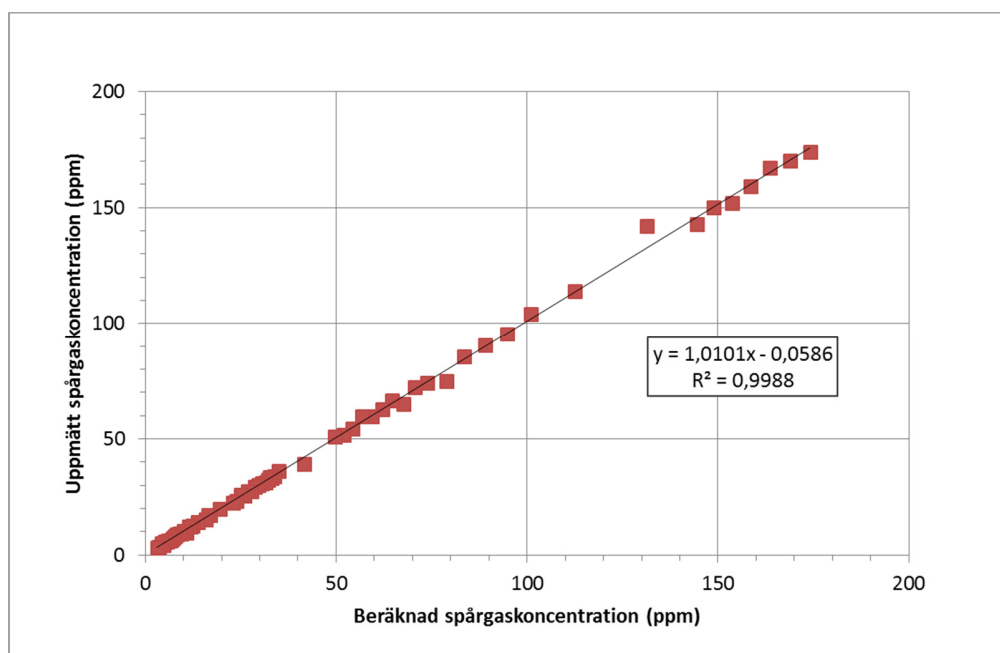
Tidssteget bestämdes av gasanalysatorns samplingsfrekvens som var ett mätvärde per 38 sek.



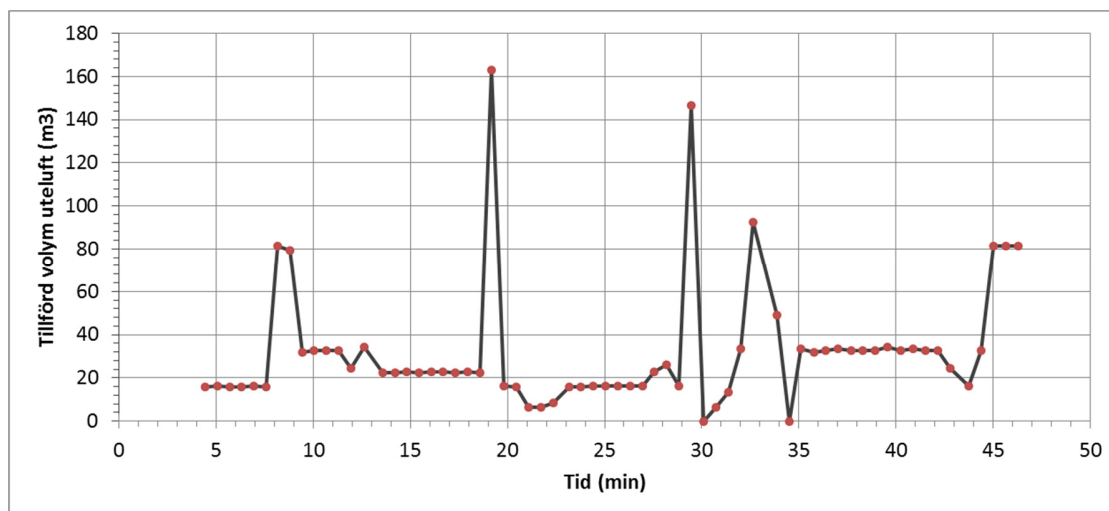
Figur 6.1 Uppmätt och beräknad spårgaskoncentration i hållplatsluften.

Av Figur 6.2 framgår att det råder en hög grad av sammastämmighet mellan uppmätt och beräknat, vilket tyder på att antagandet om fullständig omblandning är rimligt. Speciellt i samband med det kraftiga luftutbyte som sker vid busspassagera råder troligen nära fullständig omblandning. I perioderna däremellan är det emellertid möjligt att det uppstår en viss skiktning av luften i hållplatsvolymen. Detta är emellertid inget som kan utläsas ur mätresultaten.

Data i Figur 6.2 gäller under förutsättning att luftutbytet varierar med tiden så som visas i Figur 6.3. Där framgår att ca 160 m³ tillförd utomhusluft späder ut spårgaskoncentrationen vid varje busspassage (som sker strax före varje jämna 10 minuter i figuren).



Figur 6.2 Uppmätt och beräknad spårgaskoncentration i hållplatsluften.



Figur 6.3 Tillförd volym utomhusluft under varje tidssteg (38 sek) i den beräkning som redovisas i Figur 6.1 och 6.2.

7. Uppmätt termiskt klimat

Inverkan av kall buss vintertid

Figur 7.1 visar ett exempel på foto taget med en värmekamera omedelbart efter det att bussen kört in på hållplatsen. Vid det aktuella tillfället var utetemperaturen -10°C och lufttemperaturen på hållplatsen var $+15^{\circ}\text{C}$. En analys av fotot visar att yttemperaturen på bussen varierade mellan -5°C och $+24^{\circ}\text{C}$.

Medelvärdet av bussens yttemperatur enligt fotot är ca $+7^{\circ}\text{C}$.

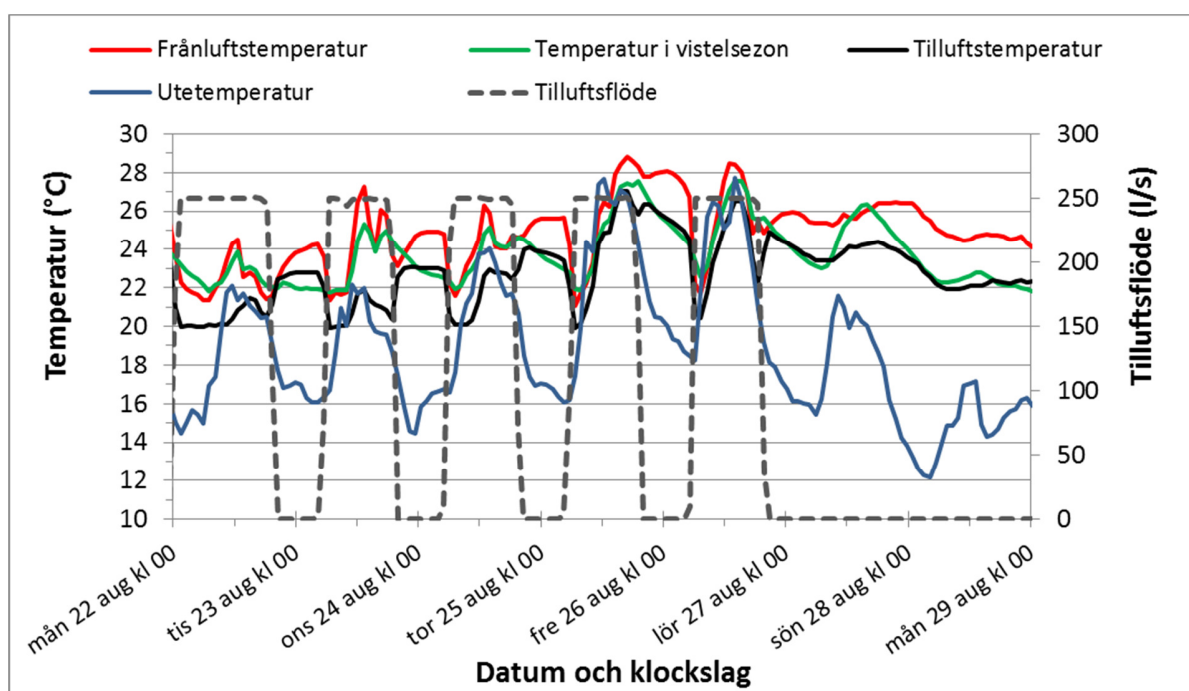


Figur 7.1 Fotografi av buss på hållplatsen, taget med värmekamera. Utetemperatur -10°C . Lufttemperatur 15°C . Genomsnittlig yttemperatur på bussen $+7^{\circ}\text{C}$ (variation från -5°C till $+24^{\circ}\text{C}$).

Vi fotograferingstillfället gjordes samtidigt mätningar med en inneklimatanalysator av fabrikat Brüel&Kjaer, typ 1213. Den operativa temperaturen uppmättes då till ca 1°C lägre än lufttemperaturen, d v s ca 14°C . Strålningstemperatursymmetrin uppmättes till 8°C . Strålningstemperatursymmetrier understigande 10°C anses normalt vara av liten eller försumbar betydelse.

Termiskt klimat vid varmt sommarväder

Figur 7.2 visar ett typiskt exempel på temperaturer uppmätta vid varmt sommarklimat. Figuren visar mätvärden för en vecka i augusti 2016. De två sista dygnen är ett veckoslut då hållplatsen inte används och dess ventilationssystem därför är avstängt. Under denna period varierade utomhustemperaturen mellan 12°C nattetid, och närmare 28°C dagtid. Av diagrammet framgår att inomhustemperaturen i hållplatsens vistelsezon varierade i intervallet 22-28 °C. Där framgår också att frånluftstemperaturen periodvis var flera grader högre än temperaturen i vistelsezonen. Detta inträffade framförallt utanför verksamhetstid, när ventilationen var avstängd. Frånluften lämnar hållplatsen ovanför vistelsezonen och resultatet visar därför att det uppstod en skiktning av luften med högre temperaturer på hög höjd över golvet. Temperaturgradienten är tydligare utanför än under verksamhetstid. Detta beror sannolikt på att portöppningar, busspassager och ventilationens omblandning då i hög grad motverkar en temperatur-skiktning i hållplatslokalen. I Figur 7.2 har det uppmätta tilluftsflödet markerats med en streckad kurva. Tilluftsflödet var ca 250 l/s under verksamhetstid och noll övrig tid.

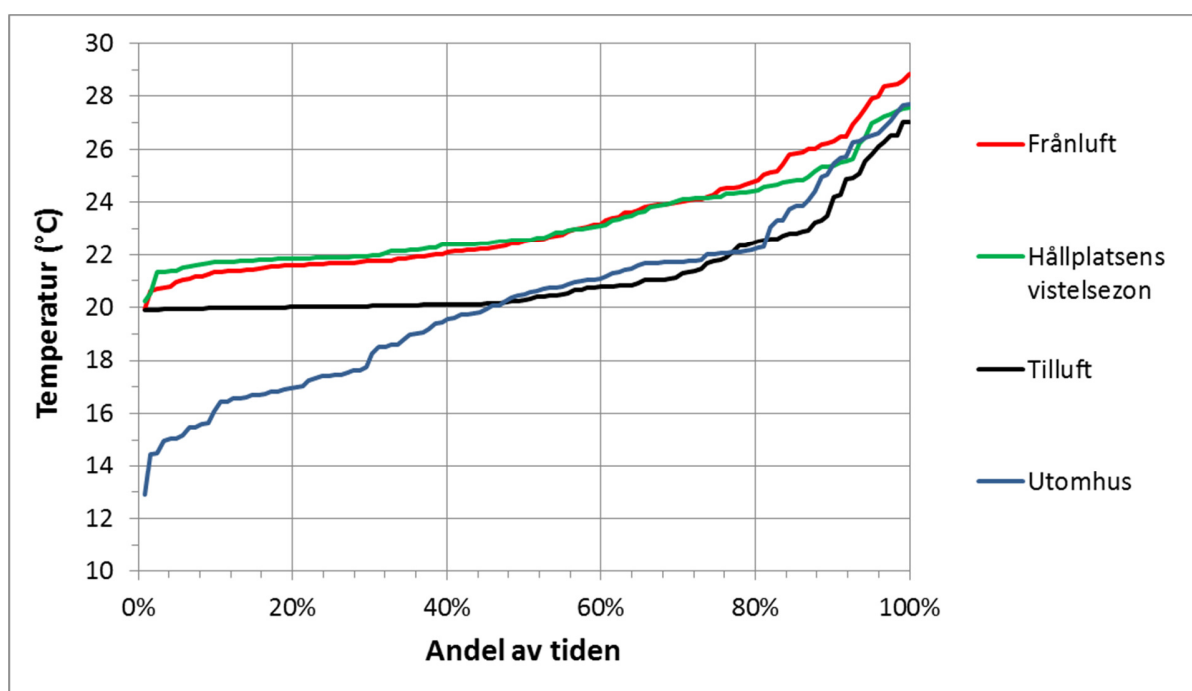


Figur 7.2. Temperaturer uppmätta under en vecka i augusti 2016. Diagrammet har kompletterats med uppgift om tilluftsflödets storlek. När luftflödet är noll är hållplatsen stängd.

I Figur 7.3 redovisas temperaturer som uppmätts endast under verksamhetstid (när hållplatsen var öppen och trafikerad) under en fjortondagarsperiod i augusti 2016. De uppmätta temperaturerna har sorterats i stigande ordning och x-axelns skala har omräknats så att den visar den andel av tiden som temperaturen var lägre det värde som respektive kurva visar. Exempelvis innebär uppgifterna i figuren

att inomhustemperaturen var lägre än 24,5°C under ca 80 % av tiden – vilket är ett vanligen använt kriterium för acceptabelt termiskt klimat i lokaler sommartid.

Vidare antyder figuren en liten temperaturskiktning även vid verksamhet, i och med att frånluftstemperaturen var någon grad högre jämfört med temperaturen i vistelsezonen – när det var som varmast. Anledningen till att tilluftstemperaturen då var något svalare än utomhustemperaturen har inte klarlagts eftersom skillnaden är liten. En förklaring skulle dock kunna vara att den plats där utetemperaturgivaren sitter är något varmare än platsen där uteluften till ventilationsaggregatet tas in. Skillnaden är liten och har inte utretts närmare.



Figur 7.3. Temperaturer uppmätta under fjorton dagar i augusti 2016. Värdena har sorterats i stigande ordning och x-axelns skala visar den andel av tiden som temperaturen var lägre än det värde som respektive kurva visar.

8. Upplevd termisk komfort

Under perioden september 2016 till maj 2017 genomfördes intervjuer med de resande vid åtta tillfällen. Intervjuerna gjordes med stöd av det frågeformulär som återges i Bilaga 2. Totalt genomfördes 175 intervjuer. Intervjusvaren och detaljer om förhållandena på hållplatsen vid intervjutillfällena summeras i Tabell 8.1. Intervjuerna gjordes vid inomhustemperaturer mellan 14,5°C och 23,0°C och då utomhus-temperaturer varierade mellan -3,1°C och +16,8°C. Den genomsnittliga klädseln varierade mellan 1,0 CLO och 1,4 CLO. Ett värde på 1,0 CLO motsvarar typisk inomhusklädsel vintertid, medan 1,4 CLO motsvarar ytterkläder för mildt vinterklimat. Men även vid de högre utomhustemperaturerna hade merparten varmare klädsel. De mest tunnklädda personerna då var iförda vad som kan betraktas som typiska sommarytterkläder – motsvarande 0,5 CLO (enligt standarden SS-EN ISO 7730).

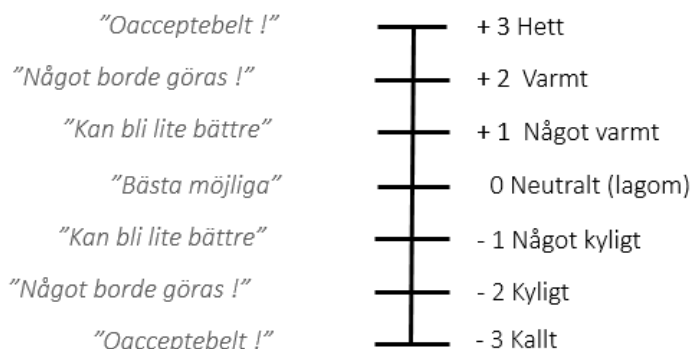
Tabell 8.1 Summering av intervjusvaren och förhållandena på hållplatsen vid intervjutillfällena.

Tillfälle	Temp. Inne	Relativ fuktighet inne	Temp. ute	Antal svarande	Klädsel [CLO]		AMV*		
	[°C]	[%]	[°C]		Medel	Min-Max	Medel	Män	Kvinnor
1	21,2	53	+14,4	20	1,02	0,5 – 1,4	+0,2	+0,14	+0,33
2	19,2	37	+6,8	23	1,14	0,5 – 1,4	+0,09	+0,11	±0
3	19,1	52	+10,4	31	1,34	1,0 – 1,4	-0,1	-0,05	-0,22
4	19,1	51	+9,7	10	1,36	1,0 – 1,4	±0	±0	±0
5	15,8	52	+9,0	21	1,4	1,4 – 1,4	-0,57	-0,75	-0,33
6	15,1	32	-0,7	27	1,4	1,4 – 1,4	-0,37	-0,25	-0,47
7	14,5	28	-3,1	21	1,38	1,0 – 1,4	-0,14	-0,14	-0,14
8	23,0	48	+16,8	22	1,22	0,5 – 1,4	+0,32	+0,5	+0,21

* AMV = Actual Mean Vote.

Resultatet av intervjuerna uttrycks i Tabell 8.1 i form av ett s.k. AMV-värde, där AMV står för "Actual Mean Vote". Detta mått ska tolkas som medelvärde av vad samtliga tillfrågade anser om det termiska klimatet när man bedömer detta på en sjugradig skala enligt Figur 8.1.

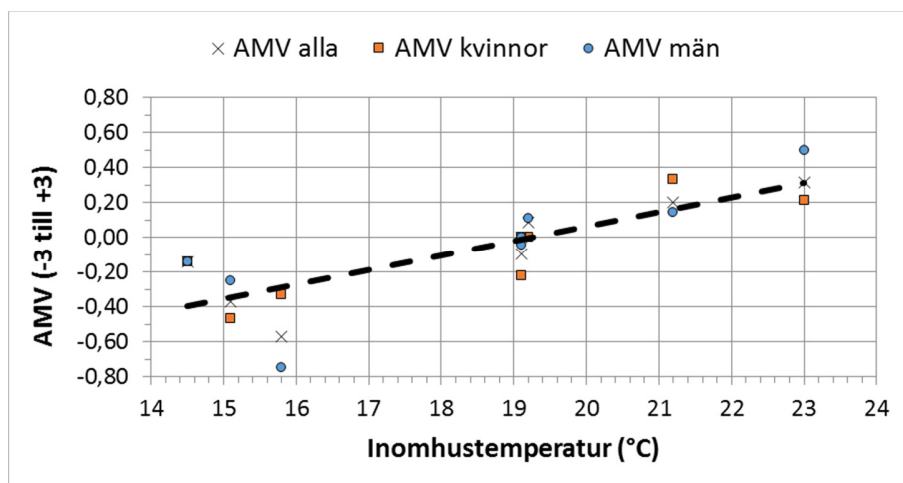
Skalan enligt Figur 8.1 användes ursprungligen som en del av ett koncept/en metod som utvecklades i början av 1970-talet av Prof. Ole Fanger, Danmarks Tekniska Universitet. Konceptet blev tidigt, och är fortfarande, 2017, internationell standard (SS-EN ISO 7730). Den standarden beskriver en metod för att förutse vad en grupp människor i genomsnitt kommer att tycka om det termiska klimatet. Detta uttrycks i termer av det s.k. PMV-indexet, som står för "Predicted Mean Vote". PMV-indexet är i standarder definierat med hjälp av skalan som visas i Figur 8.1. Utvärderingen av det termiska klimatet på inomhushållplatsen baseras på samma koncept, men istället för att försöka förutse vad en grupp människor kommer att tycka i genomsnitt så har personerna tillfrågats och gruppens utlåtande i genomsnitt har beräknats och anges som ett AMV-index (Actual Mean Vote).



Figur 8.1 Sjugradig skala för bedömning av termiskt klimat, efter Fanger (1970) och standarden SS-EN ISO 7730. De beskrivande orden till höger om skalan är hämtade från standarden. Orden/värdeomdömena till vänster är författarens tolkning av skalans innebörd.

Standarden SS-EN ISO 7730 är aktuell bland annat genom att den ofta ligger till grund för formulering av krav på det termiska inomhusklimatet. I Arbetsmiljöverkets föreskrift AFS 2009:2 finns ett råd som innebär att PMV-indexet i en arbetslokal bör ligga i intervallet $\pm 0,5$. Som framgår Av Tabell 8.1 och av Figur 8.1 ligger nästan alla observerade AMV-värden inom detta intervall. Detta kan tolkas som att inomhushållspaltsens termiska inomhusklimat på det hela taget värderas som bra av de resande.

Regressionslinjen i Figur 8.2 visar AMV-värdet ± 0 vid inomhustemperaturen 19°C . Detta kan tolkas som att 19°C är en bra och eftersträfvansvärd inomhustemperatur i alla lägen. I Figur 8.2 redovisas resultatet dels för samtliga intervjuade, dels uppdelat på män respektive kvinnor. Vissa skillnader syns mellan könen, men det går inte att urskilja någon speciell systematik. En orsak kan vara att undersökningsmaterialet är allt för litet.

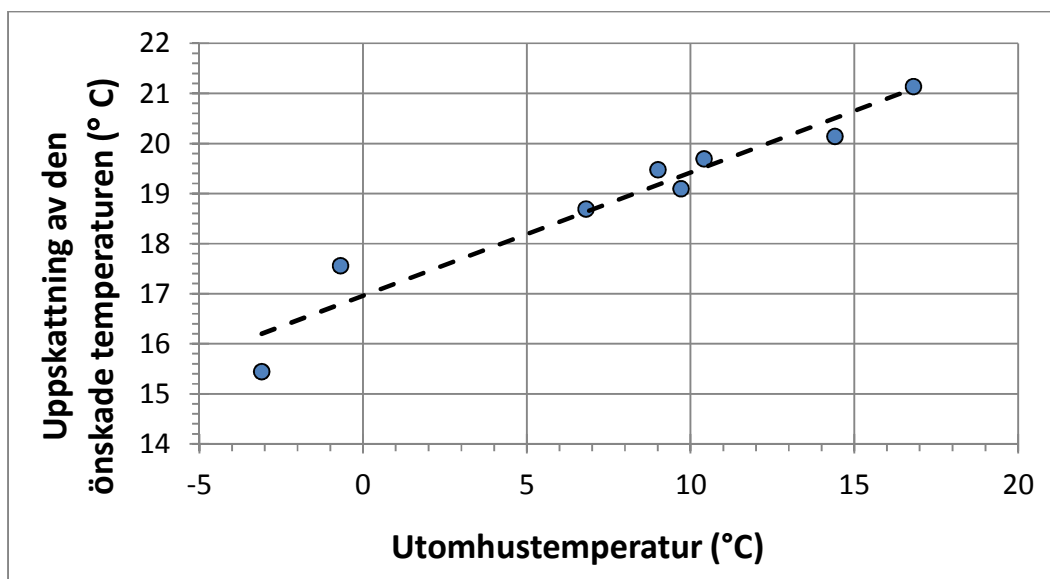


Figur 8.2 Observerade AMV-värden (de intervjuade resenärernas bedömning av det termiska inomhusklimatet) plottade mot samtidigt uppmätt inomhustemperatur.

För alla de fall i Figur 8.2 där AMV-indexet avviker från ± 0 infinner sig frågan om vilken temperatur det borde varit för att indexet skulle blivit just ± 0 , d v s det bästa termiska inomhusklimatet, där gruppen av personer som helhet, i genomsnitt, är nöjd. Som framgår av analysen nedan visar det sig att denna, i någon mening optimala temperatur, inte alltid är 19°C. En uppskattning av den optimala temperaturen kan göras med ledning av de samband som återfinns i SS-EN ISO 7730. Där presenteras Prof. Fangers s.k. komfortekvation; ett matematiskt uttryck för sambandet mellan klädernas värmeisolerande förmåga (CLO), människornas aktivitetsnivå (MET), lufttemperaturen, medelstrålningstemperaturen, luftens rörelser (luft hastighet), luftens relativa fuktighet (%RF) och det förväntade medelvärdet av gruppens bedömning av det termiska klimatet (PMV-indexet). Med ledning av det sambandet kan man för varje uppsättning av indata beräkna hur stor förändring av temperaturen som skulle krävs för att erhålla en viss förändring av gruppens bedömning av klimatet.

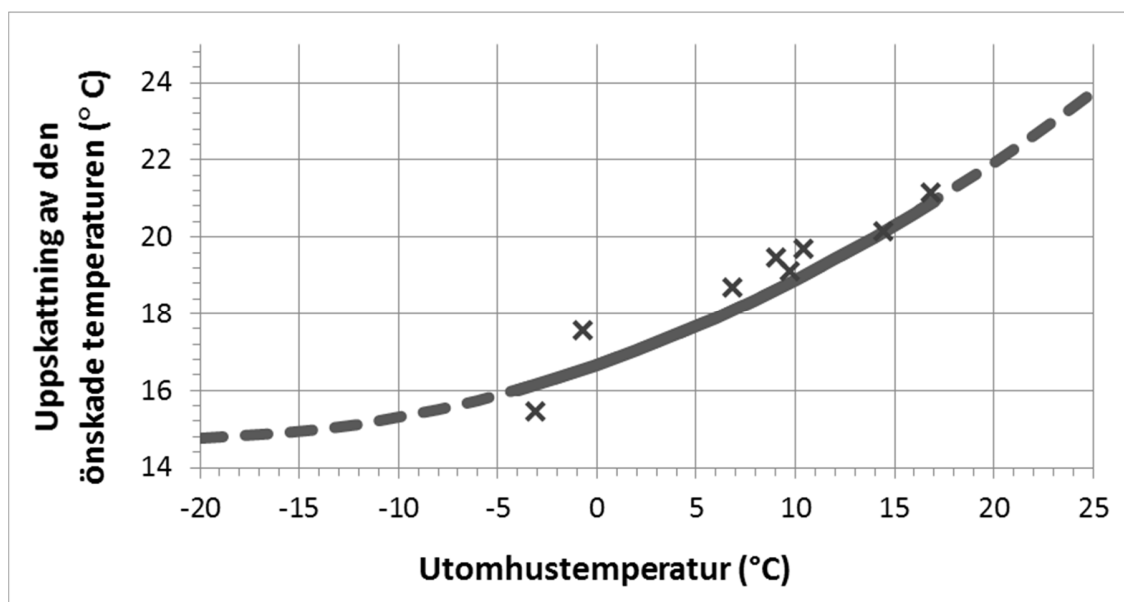
Med data från Tabell 8.1 tillsammans med antagandet att lufrörelsernas hastighet i vistelsezonen uppgår till ca 0,15 m/s, och att det endast är liten skillnad mellan lufttemperaturen och medelstrålningstemperaturen kan beräkningar enligt föregående stycke göras. Att de båda antagandena är rimliga har bekräftats genom mätningar. Resultatet av analysen presenteras i Figur 8.3, där varje datapunkt med ledning av Fangers komfortekvation kan förväntas innebära att AMV-indexet skulle bli nära ± 0 om vi hade fått tillfälle att genomföra nya intervjuer vid de aktuella fallen.

Resultatet i Figur 8.3 har plottats mot den utomhustemperatur som uppmättes vid varje intervju tillfälle. Resultatet ter sig följa ett tydligt samband där den uppskattade önskade temperaturen sjunker med sjunkande utomhustemperatur. I det avseendet är resultatet helt rimligt och troligt eftersom lägre utomhustemperatur sannolikt innebär att resenärerna bär mer kläder och eftersom de flesta resenärerna bär ytterkläder både vid resande till hållplatsen och från den. Den streckade regressionslinjen illustrerar möjligen ett samband inom det utetemperaturintervall som datapunkterna innefattar. Såväl vid lägre som högre utomhustemperaturer planar sambandet sannolikt ut och går mot horisontella linjer. Några sådana data har tyvärr inte kunnat studeras, framförallt då lägre kallare uteklimat förekommit mycket sparsamt under projektets gång.



Figur 8.3 Uppskattning av den önskade inomhustemperaturen på hållplatsen som funktion av utomhustemperaturen. Baserat på enkätsvar.

Med ledning av Figur B2.1 i Bilaga 2 tycks det rimligt att anta att den uppskattade önskade inomhustemperaturen på hållplatsen går mot ca 15 °C vid utomhustemperaturer under -5 °C. Vid utomhustemperaturer över ca 17 °C verkar det med motsvarande resonemang rimligt att den önskade inomhustemperaturen går mot 23 °C. Således kan man anta att sambandet snarare följer en kurva lik den som visas i Figur 8.4.



Figur 8.4 Justerad uppskattning av den önskade inomhustemperaturen på hållplatsen som funktion av utomhustemperaturen. Heldragen kurva markerar regressionslinje med värden inom det observerade temperaturintervallet. Streckad kurva markerar extrapolerade värden.

9. Luftkvalitet

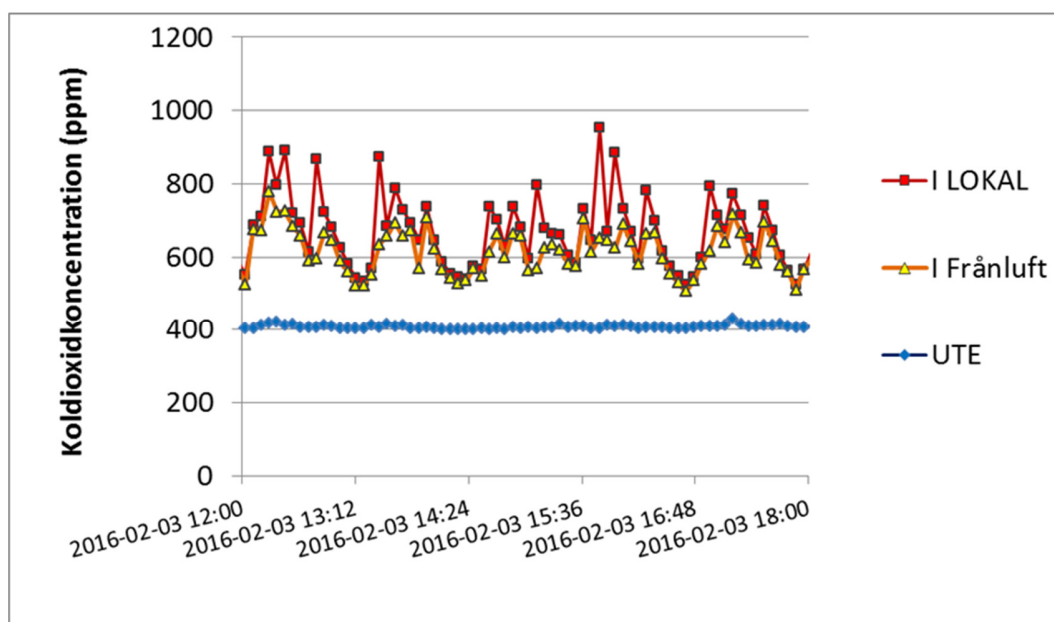
Inomhusluftens kvalitet har bedömts genom mätning av koldioxidkoncentrationen ute och inne. Dessutom har mätningar av luftens innehåll av partiklar genomförts. Dessa två mått på luftens kvalitet redovisas i tur och ordning nedan.

Koldioxidmätningar

Utomhus är bakgrundskoncentrationen normalt mycket nära 400 ppm (parts per million – miljondels volymsandelar). Att så är fallet på den aktuella platsen visas i Figur 9.1. Människors närvaro inomhus gör att koldioxidkoncentrationen blir högre inne än ute. Vid tämligen stillsam aktivitetsnivå kan man anta att en person andas ut cirka 20 liter koldioxid per timma.

Ett vanligt riktvärde är att koldioxidkoncentrationen inomhus inte bör överstiga 1000 ppm mer än tillfälligt. Egentligen handlar det om att tillskottet av koldioxid från människor - utöver det som tillförs utifrån inte bör öka koncentrationen med mer än 600 ppm annat än tillfälligt. En koldioxidnivå som är större än så är ett tecken på att ventilationsflödet är för lågt i förhållande till det antal personer som vistas i den aktuella lokalen. Riktvärdet på maximalt 1000 ppm koldioxid i inomhusluften återfinns bland annat i Arbetsmiljöverkets och Folkhälsomyndighetens föreskrifter, inte som tvingande lagkrav, men som allmänt råd.

I Figur 9.1 redovisas ett exempel på koldioxidkoncentration inne på hållplatsen och utomhus, uppmätt under en februaridag 2016.



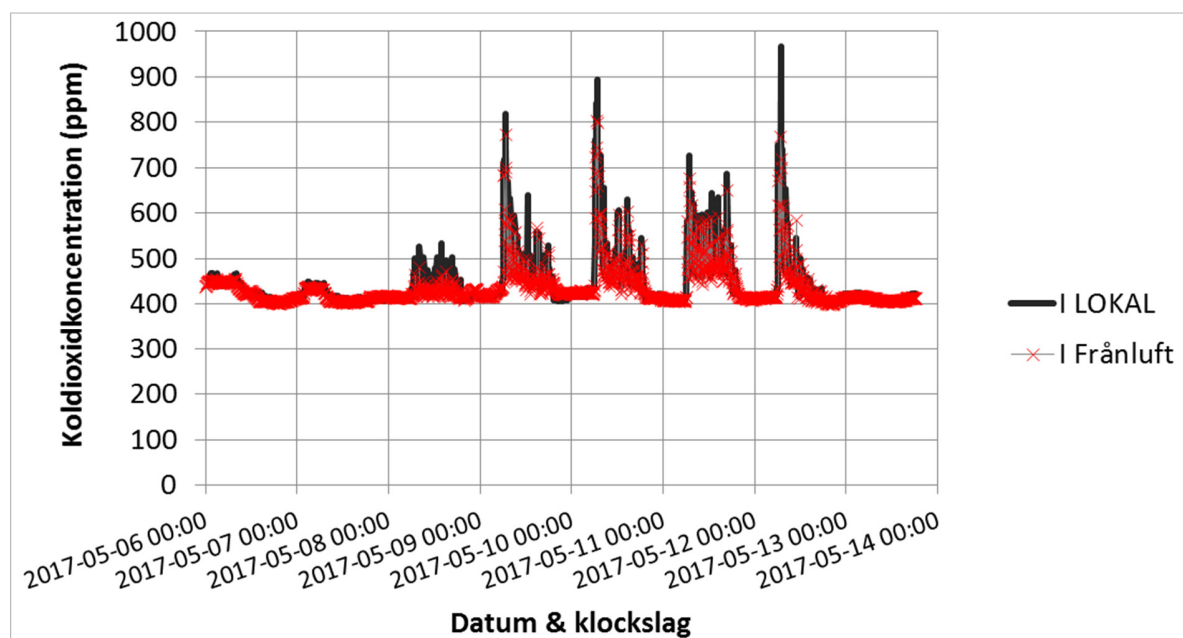
Figur 9.1 Exempel på koldioxidkoncentration uppmätt i vistelsezonen (LOKAL), frånluften och utomhus. Frånluften tas på hög höjd över golvet och mätningen visar att det är något renare luft där än i vistelsezonen.

Den mätserie som i Figur 9.1 benämns LOKAL är belägen i vistelsezonen. Frånluften tas på hög höjd över golvet och mätningen visar att det är något renare luft där än i vistelsezonen. Koncentrationen översteg inte riktvärdet 1000 ppm någon gång under den aktuella mätperioden, varken i frånluften eller i vistelsezonen.

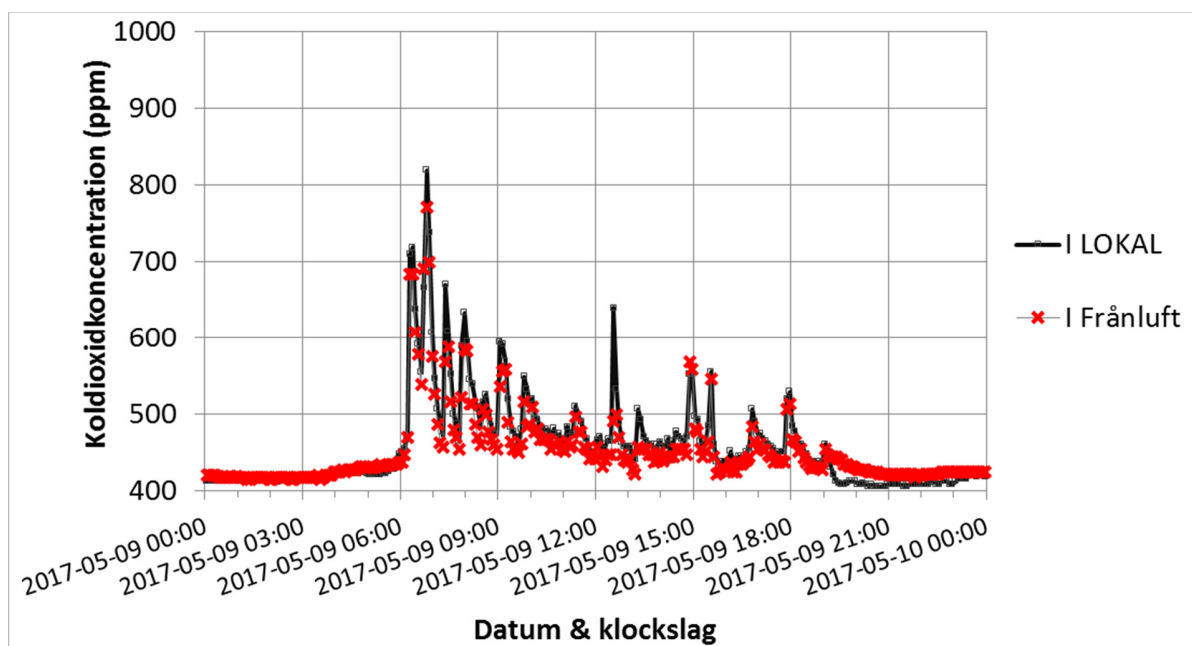
I Figur 9.2 redovisas en koldioxidmätning genomförd under en vecka i maj 2017. I Figur 9.3 visas mätvärdena för ett av dygnet under samma vecka. Vidare redovisas koldioxidkoncentrationens varaktighet under hållplatsens öppettider i Figur 9.4. Resultaten bekräftar iakttagelserna i Figur 9.1, dvs. först och främst att koldioxidkoncentrationen normalt är betydligt lägre på inomhushållplatsen jämfört med de ovan nämnda riktvärdet på 1 000 ppm. Luftkvaliteten i detta avseende kan därmed bedömas som god.

Det är något lägre koldioxidkoncentration i frånluften än i vistelsezonen (LOKAL). Detta beror sannolikt på att det sker en skiktning av luften i lokalen och att tilluften inte utnyttjas fullt ut för att transportera bort föroreningar som alstrats inomhus (en del av tilluften transporteras direkt ut med frånluften utan att passera vistelsezonen och stiger). Detta kan betraktas som förväntat med tanke på att tilluften tillförs lokalen på hög nivå över golvet genom en perforerad kanal, och tilluften används periodvis för att värma lokalen (tilluften har högre temperatur än rumsluften). Dettas bidrar till att tilluften inte blandas om fullständigt med rumsluften. Luften blandas emellertid om ganska kraftfullt i samband med bussens utpassage, vilket motverkar den observerade skiktningen av luften.

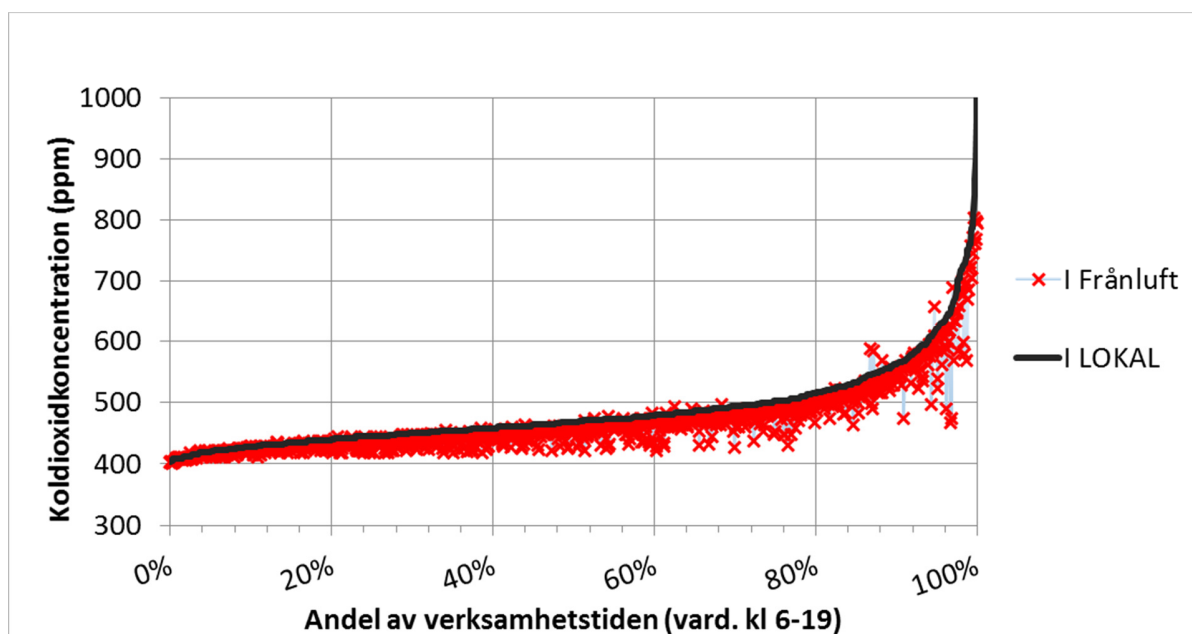
Notera att luftflödet är högt i förhållande till antalet personer som vistas på hållplatsen, vilket gör att det inte är fråga om något problem beträffande hållplatsluftens kvalitet.



Figur 9.2 Koldioxidkoncentration uppmätt under en vecka i maj 2017.



Figur 9.3 Koldioxidkoncentration uppmätt under ett av de dygn som redovisas i föregående figur.

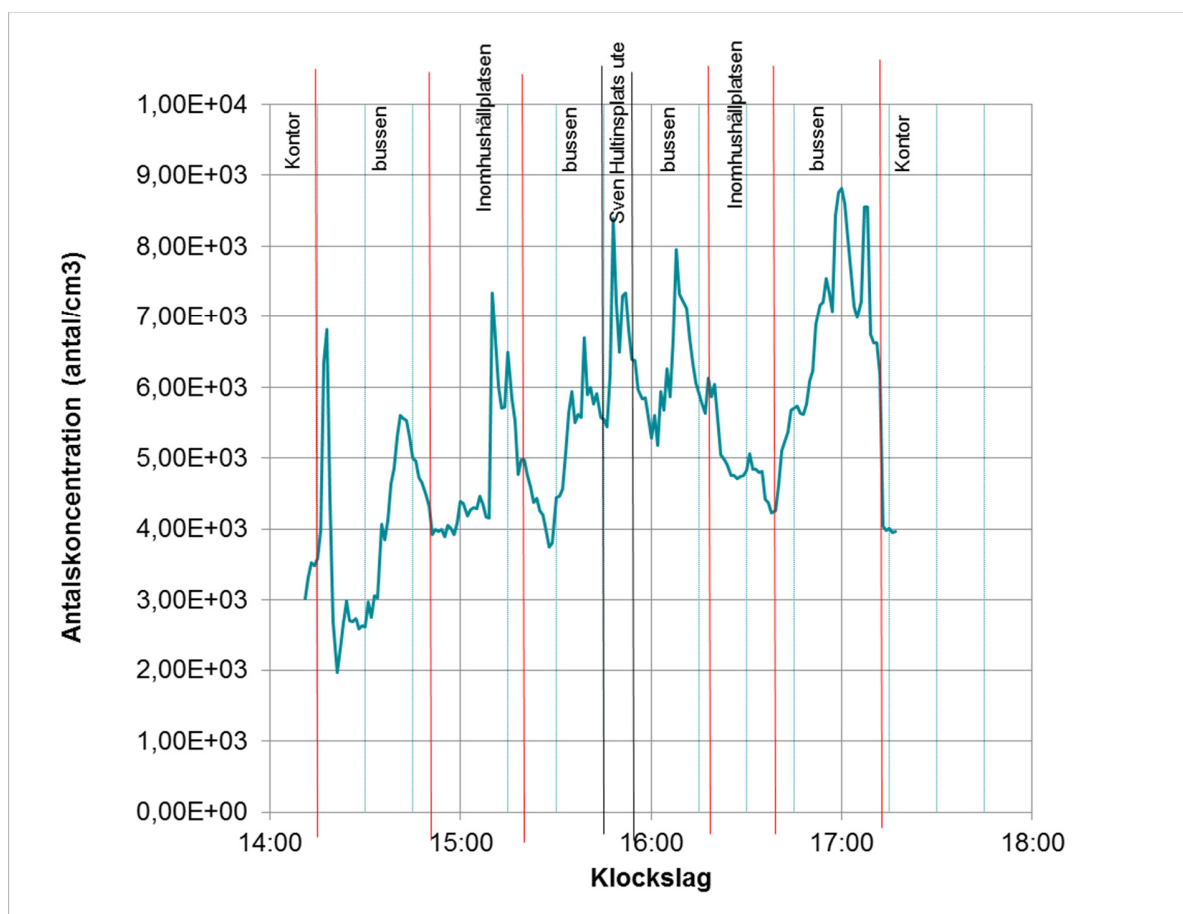


Figur 9.4 Koldioxidkoncentrationer uppmätta vardagar mellan kl 6 och kl 19 under två veckor i maj 2017. Data har sorterats från lägsta till högsta koncentration uppmätt i frånluften.

Partiklar

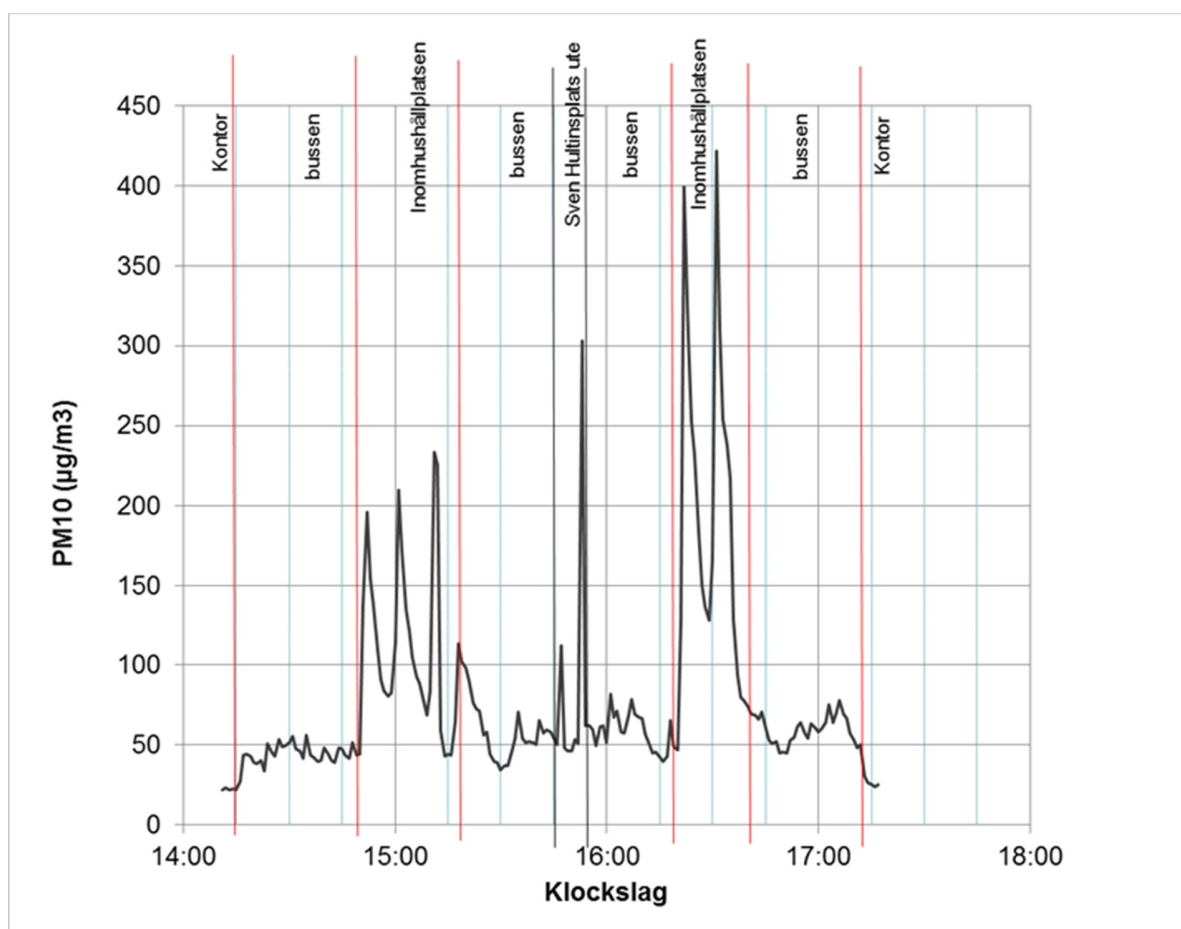
I Figur 9.5—9.8 redovisas resultatet av en serie partikelmätningar. Dels redovisas det totala antalet partiklar större än 10 nanometer (nm). Detta partikelmått inbegriper s.k. ultrafina partiklar eller nanopartiklar. En betydande källa till sådana partiklar är förbränning, till exempel i dieselmotorer. Ett annat mått som redovisas i figurerna är masskoncentrationen av partiklar av storlekar upp till 10 mikrometer (μm). Aerosoltekniskt är detta att betrakta som rätt stora partiklar som skiljs av från luften till stor del genom att partiklarna sedimenterar – d.v.s. faller till golvet. Sedimenterade partiklar virvlar lätt upp och bidrar ånyo till koncentrationen av PM10. I stadsmiljöer är slitprodukter från kontakten mellan däck och asfalt en betydande källa till sådana partiklar. Vanligen förekommande ventilationsfilter skiljer ofta av en betydande del av dessa partiklar. I inomhusmiljöer bidrar partiklar från människor (t ex hudfragment och textilfibrer) till koncentrationen.

Både i Figur 9.5 och 9.6 syns att de lägsta partikelhalterna observerades i den studerade kontorsmiljön. En förklaring är att de filter som normalt används i sådana miljöer i stor utsträckning fångar de aktuella partiklarna. Koncentrationen små partiklar, som visas i Figur 9.5 varierade stort på de övriga mätplatserna. Detta beror sannolikt på varierande lokal påverkan exempelvis från förbipasserande förbränningsmotordrivna fordon. Denna inverkan syns inte bara utomhus utan även ombord på bussen och inne på inomhushållplatsen. Båda dessa miljöer påverkas av ett periodvis kraftigt luftutbyte mot det fria – då dörrar/portar öppnas.



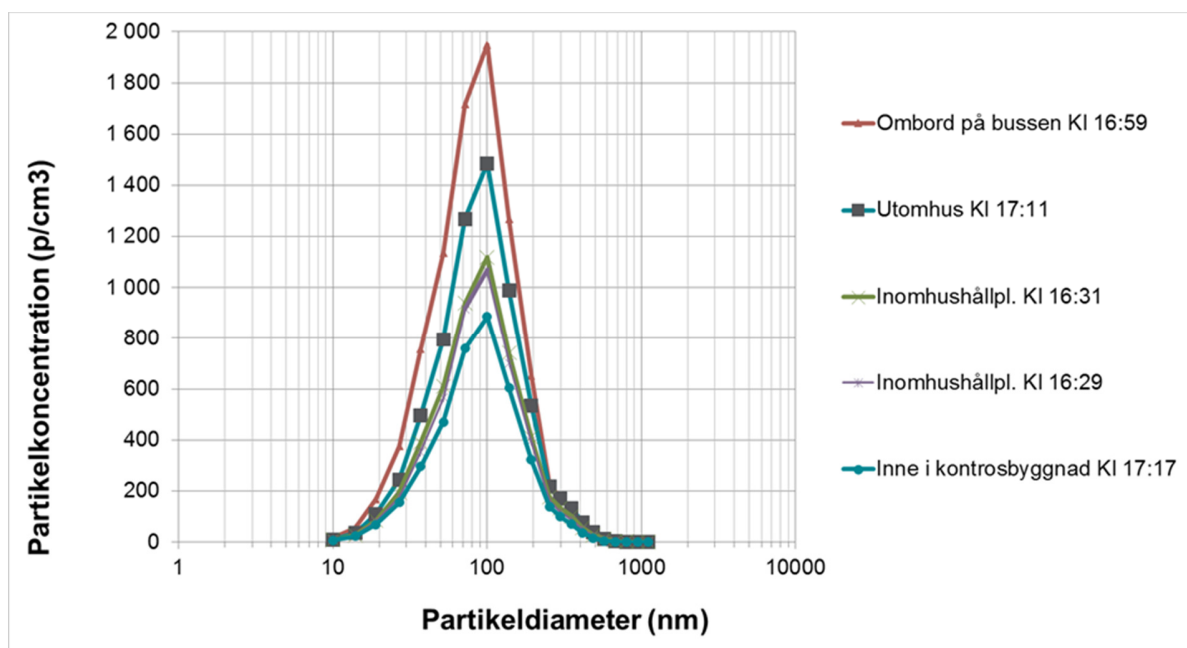
Figur 9.5 Uppmätt antalskoncentration av partiklar större än 10 nanometer. Detta mått inkluderar s.k. ultrafina partiklar. Mätningen startade och slutade på ett kontor i Chalmers teknikpark där emellan skedde två resor med busslinje 55 från ändhållplatsen i Johanneberg till inomhushållplatsen på Lindholmen.

I Figur 9.6 syns flera tämligen regelbundna koncentrationstoppar vid mätningarna inne på inomhushållplatsen. Det visade sig att koncentrationen PM10 den aktuella mät dagen steg markant i samband med varje busspassage. Koncentrationen steg då långt över 50 mikrogram per m^3 , som är den rådande miljö kvalitetsnormen för PM10 (dygnsmedelvärde 90-percentil). Koncentrationen sjönk igen snabbt efter busspassagen. Det tycks vara fråga om att damm som sedimenterat på golvet rivs upp och blir luftburet av de rätt kraftiga luftrörelser som bildas när luftridåerna går på högfart i samband med att portarna öppnas. Den aktuella dagen var det torr väderlek. Det är inte klarlagt om detta förekommer regelmässigt eller om det var en tillfällighet den aktuella mät dagen. Mätning vid ett annat tillfälle – med något fuktig väg bana – visade ingen tendens till motsvarande kraftiga koncentrationsökning.

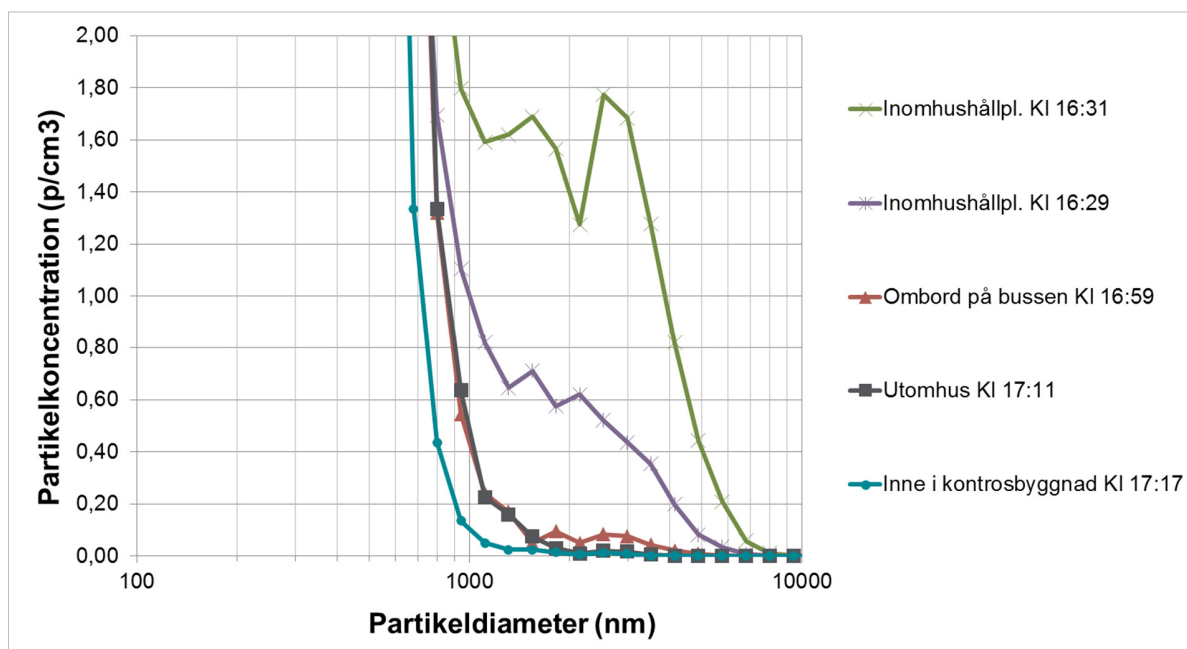


Figur 9.6 Uppmätt masskoncentration partiklar av storlekar upp till 10 mikrometer (kallas PM10). Mätningen startade och slutade på ett kontor i Chalmers teknikpark. Där emellan skedde två resor med busslinje 55 från ändhållplatsen i Johanneberg till inomhushållplatsen på Lindholmen.

I Figur 9.7 och 9.8 illustreras ovanstående observationer med hjälp av diagram som visar partiklarnas storleksfördelning. Figur 9.8 innehåller samma data som Figur 9.7, men har en annan skala för att det ska vara möjligt att urskilja kurvorna för större partiklar (större än $1000 \text{ nm} = 1 \mu\text{m}$).



Figur 9.7 Partikelstorleksfördelning uppmätt ombord på bussen, utomhus, på inomhushållplatsen, samt på ett kontor i Chalmers teknikpark. Resultatet från inomhushållplatsen redovisas dels strax innan busspassage, dels strax efter busspassage.



Figur 9.8 Partikelstorleksfördelning uppmätt ombord på bussen, utomhus, på inomhushållplatsen, samt på ett kontor i Chalmers teknikpark. Resultatet från inomhushållplatsen redovisas dels strax innan busspassage, dels strax efter busspassage.

10. Datorsimuleringar

I syfte att kunna förutsäga och värdera busshållplatstillbyggnadens inomhusklimat och energianvändning för olika scenarier och tekniska lösningar, är en simuleringsmodell användbar. Ju mer verklighetsöverensstämmande modellen är desto relevantare blir svaren.

För att avgöra hur bra busshållplatstillbyggnadsmodellen är jämfördes simulerade temperaturer med uppmätta temperaturer. När tillräcklig överensstämmelse bedömdes uppnådd låstes modellen som s.k. referensmodell, dvs. en kalibrerad grundmodell varifrån senare analyser kom att utgå.

Simuleringarna gjordes i modelleringsverktyget IDA ICE. Väderdata har erhållits från SVEBY¹ och baseras på uppmätta uppgifter från SMHI för Göteborg, Gullbergsvass 2016.

Nedan redovisas först modellens uppbyggnad och simuleringsförutsättningar, följt av resultatsammanställningar och slutsatser. En sammanställning av modellens indata med avseende på geometri, klimatskal och internvärme återfinns i Bilaga 3.

Ovanligt snabba och påverkande händelser

Byggnadsimuleringar för att beräkna energianvändning och temperaturer, etc. kan i allmänhet betraktas som "semi-statiska". Med det begreppet avses här ett tillstånd där det förvisso kan finnas ett stort antal dynamiska löpande förlopp som exempelvis varierande solinstrålning och olika schemalagda händelser såsom personnärvaro, belysning, fönsteröppningar, mm. Men dessas faktiska inverkningar är normalt sett begränsade och relativt långsamma, eller resulterar åtminstone inte i mycket direkta och kraftiga förändringar av resultaten.

För hållplatstillbyggnaden förhåller det sig annorlunda. Om dess blygsamma golvarea och volym på sammanlagt 145 m² respektive 685 m³ sätts i relation till portarnas area på 13 m² och bussarnas volym på ca 100 m³, inses lätt att ständiga och hastiga portöppningar och bussförflyttningar på ett kraftigt sett skulle påverka rumsklimatet om det inte samtidigt kompenseras av likaledes snabba och kraftfulla klimathållningssystem. Särskilt vintertid. För att hantera detta simuleringsmässigt krävs dynamiska modeller, vilket alltså är relativt ovanligt.

Vid kalibrering av modellen lades stor vikt vid tidsaspekten för olika händelser, inte minst avseende portöppningar och bussförflyttningar. Lyckligtvis fanns goda förutsättningar för detta eftersom ElectriCity-projektet som sådant tillhandahöll god och noggrann datainsamling med hög tidsupplösning.

¹ Sveby står för "Standardisera och verifiera energiprestanda i byggnader" och är ett branschöverskridande program som tar fram hjälpmedel för överenskommelser om energianvändning.

Övergripande om modellen och dess interna värmelaster

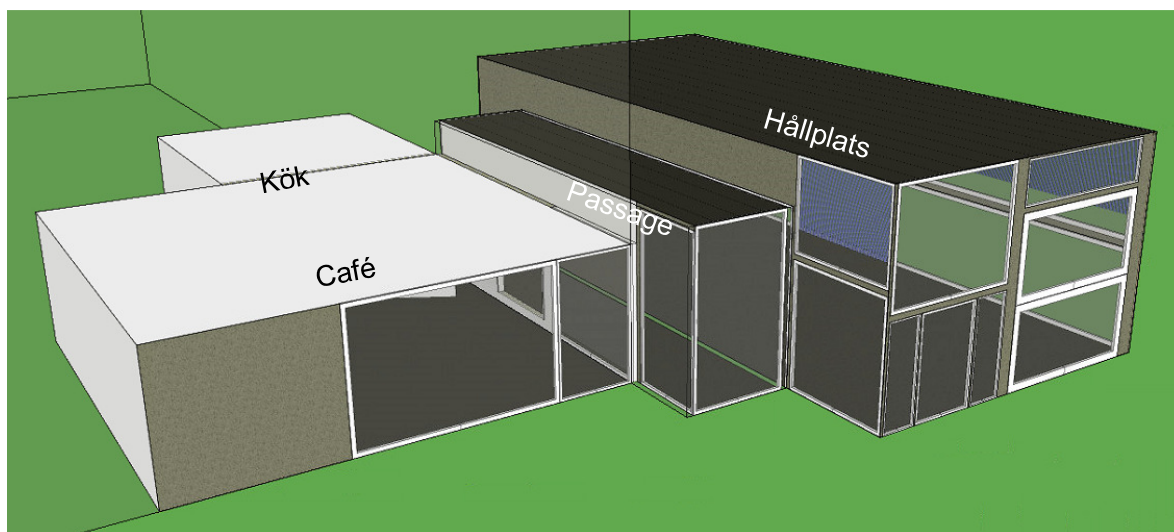
Modellen består av sammanlagt fyra olika zoner. Runt modellen finns relativt tät bebyggelse som delvis skuggar tillbyggnaden. I modellen tas hänsyn till skuggning genom att intilliggande byggnader lagts in som skuggande siluetter med angivna geometrier och placeringar.

Café och kök

Två av modellens zoner, ett café och ett kök om vardera 85 m² respektive 32 m², hör till den äldre byggnadskroppens entréplan. Att de zonerna alls beaktas i detta sammanhang beror på att de förbinds med en dörr till busshållplatsen. Dörren öppnas relativt frekvent, varvid ett visst värmeutbyte sker med busshållplatsens två zoner.

Passage

Den mindre av hållplatstillbyggnadens två zoner kallas här för "passagezonen" eftersom den förbinder den äldre byggnadskroppen med den nya "hållplatszonen". Mellan de nya zonerna är det helt öppet. I passagezonen sker inte mycket, bara kortvarig närvaro av ett fåtal personer i väntan på buss. Höjden till tak är 3,8 m och fasaderna är mestadels av glas.



Figur 10.1 Hållplatstillbyggnaden och dess intilliggande zoner.

Hållplats

Hållplatszonen, med golvarean 120 m² och 4,8 m i takhöjd, kan sägas vara modellens motor med flera hastiga, kraftiga och frekventa återkommande händelser.

Fasaderna är glasade, vilket gör den mottaglig för solens inverkan. Hållplatsens långsida vetter dock i NNO riktning, vilket minimerar solinstrålningen. Dessutom finns ett invändigt solskydd i form av träribbor utmed denna långsida.

Den motsatta långsidan i SSV riktning skymms till större delen av passagezonen och den äldre byggnadskroppen.

Portar

När bussen anlöper öppnas en glasad ankomstport. Öppningsförloppet utgörs av tre faser vilka observerats och tidtagits vid ett flertal tillfällen. Först går porten upp under 3 sekunder, därefter kör bussen in genom porten i 7 sekunder under det att porten står helt öppen i 15 sekunder. Slutligen stängs porten under 7 sekunder. Exakt vad som händer med luftflöde och värmebalans när en port öppnas och en buss kör igenom, är komplext och modellen kan inte helt korrekt återge ett sådant förlopp. Förvisso hanterar modellen termiska drivkrafter och tryckförhållanden för olika öppningar i klimatskalet, men en sådan "störning" som bussen utgör när den kör in, kan här bara hanteras förenklat.

Bussvolym till och från hållplatsen

Som tidigare nämnts utgör bussen en sluten volym om ca 100 m³. Den volymen tillförs hållplatsen under de 7 sekunder det tar för bussen att köra in. Eftersom en port är öppen när bussen kör in ökar inte tryckskillnaden mellan ute och inne. I modellen hanteras förloppet genom att en s.k. aktiv läcka placeras bredvid ankomstporten. En aktiv läcka är ett användbart verktyg i form av ett schemalagt luftflöde, utan koppling till fläkt. Vid bussankomst blåser modellens aktiva läcka ut 100 m³ luft på 7 sekunder, vilket motsvarar 14 286 l/s.

På motsvarande vis finns en aktiv läcka som blåser in luft under 7 sekunder med ett lika stort flöde när bussen kör ut.

Hög tidsupplösning är viktigt

Aktuella tidsförlopp är av avgörande betydelse för kalibreringen av modellen eftersom de så kraftigt påverkar situationen inomhus. Klimatmätningarna i hållplatsen gjordes med hög tidsupplösning. Vid en jämförelse mellan modellens resultat för inomhusklimat och en uppmätt verklighet skulle en felaktig schemaläggning av portarnas öppningstider i programmet bli tydlig.

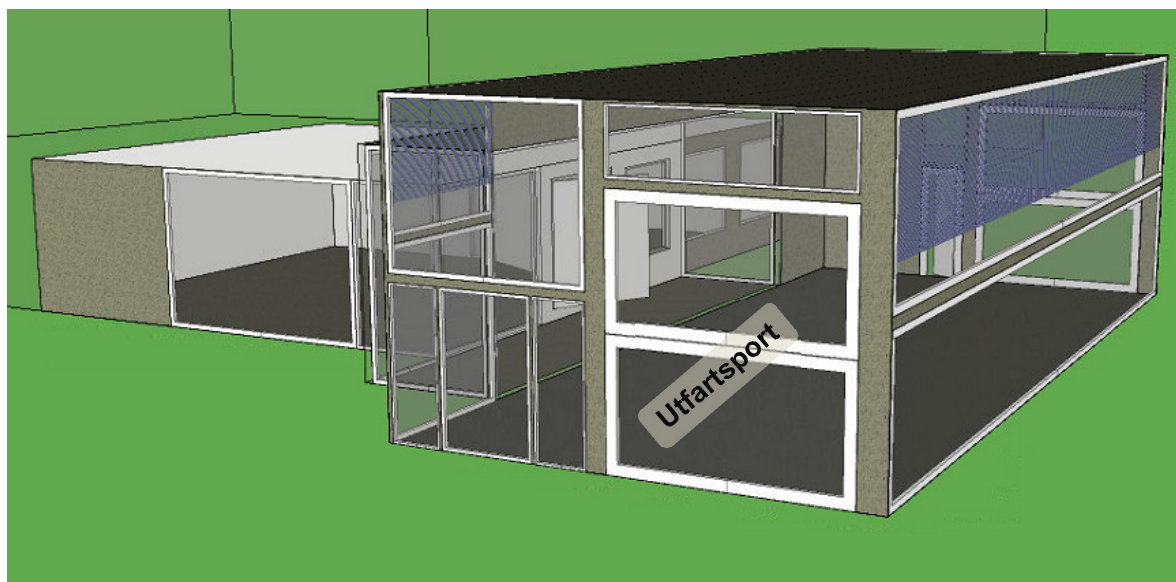
Västtrafik bistod med uppgifter om exakta ankomsttider för bussarna. Varje gång en buss närmat sig hållplatsen har en signal skickats till Västrafraks databas som lagrat tiderna med sekundupplösning. På det viset har exakta tider för portöppning och inkörning av buss erhållits för den aktuella kalibreringsperioden (7-11 november 2016). Modellen arbetar således med verklighetsbaserade tidsuppgifter, inte tidtabeller etc. Tyvärr är uppgifterna om tiderna för bussens avgång mer osäkra. GPS-signalen till Västtrafik om att bussen åkt skickas då den lämnat hållplatsen bakom sig med ca 25 m. Här finns dock osäkerheter kring hur lång tid det tagit att köra dit. Enligt observationer är det i de flesta fall ett tidsförlopp på ca 6 sekunder. Därefter går det att räkna bakåt till den tidpunkt då porten började öppnas osv. Problemet är bara att bussen ganska ofta blir stående mitt i portöppningen eftersom ett välanvänt gångstråk passerar direkt utanför porten. Därefter kan hända att bussen måste stanna ytterligare tillfällen pga. personer i vägen, innan den kört sträckan till den punkt då signalen skickas. Det senare är i sammanhanget ett begränsat problem, men den ibland förlängda tiden med öppen port är ett

större problem. Dels naturligtvis ur simuleringssynpunkt eftersom uppgifter saknas om detta, dels komfortmässigt vintertid för personerna inne i hållplatsen.

Värmealstring i hållplatsen

Bussens värmeutbyte med hållplatsen beror på flera olika saker och går inte att kvantifiera exakt. Men det är delvis avhängigt utomhustemperaturen, varför en algoritm baserat på värmeutbyte mellan bussens utvändiga ytor och zonen användes. Låga temperaturer utomhus orsakar kalla bussytor, vilket leder till värmeförluster i hållplatsen. Å andra sidan finns där även en motor och ett kraftfullt AC-system på busstaket som avger värme. För simuleringar under andra perioder än sommar har antagits att AC-systemets värmeavgivning kan försummas. Motorns värmeavgivning antogs vara densamma oavsett årstid. Mer om detta i Bilaga 3.

Uppgifter om antal personer och belysning och deras "närvarotider" baseras på platsobservationer.



Figur 10.2 Hållplatszonen med den glasade utfartsporten i förgrunden.

Övergripande om modellens klimathållningssystem

Café, kök och passage

Klimathållningssystemen i café och kök är av "standardkaraktär" och har modellerats förenklat. Passagen saknar klimathållningssystem eftersom den är så liten och helt kan tillgodogöra sig inverkan av hållplatsens installationer. Och de övriga två utrymmena har modellerats med s.k. fiktiva ideala värmare och kylare för att hålla en viss temperatur. I övrigt har caféet och köket balanserad ventilation med värmeåtervinning för att till- och bortföra bedömda luftflöden motsvarande ca 25 l/s respektive 165 l/s.

Att café och kök här behandlats förenklat beror på att de zonerna i denna studie endast fyller en värmeutbytande funktion med passage och hållplats.

Hållplats

Hållplatsen ventileras av två aggregat; ett huvudsakligen för luftutbyte, det andra huvudsakligen för värmestöd.

Allmänventilation för luftutbyte

Luftutbytet ombesörjs av ett värmeåtervinnande Swegon GOLD-aggregat, som sedan länge kan anses vara ett vanligt aggregat på marknaden. Aggregatet till- och bortför 250 l/s vardagar kl. 05.50-19.20. Övriga tider är det avstängt. Inblåsningstemperaturen är konstant (20 °C) och värmeåtervinningsgraden är 85 %. För hållplats- och passagezonen motsvarar GOLD-aggregatets luftflöde ca 1,7 l/sm² eller ca 1,3 rumsvolymomsättningar per timma.

Transformatorventilation för värmestöd

Det andra luftbehandlingsaggregatet tar luft från ett intilliggande transformatorrum för bussarnas eluppladdning. Transformatorn genererar mycket värme vid laddning och för att kyla av den ventileras transformatorrummet mot hållplatszonen dygnet runt alla dagar. Luften från transformatorrummet blåses vintertid in i hållplatszonen som stödvärme. När det inte föreligger värmebehov på hållplatsen blåses luften istället ut till det fria. Transformatorventilationen utgörs av en fläkt och ett spjällarrangemang. Aggregatet i modellen består dock av två separata fläktar. En för luft in till hållplatsen, en för luft ut från hållplatsen. Transformatorventilationen tillför ingen friskluft.

Eftersom laddningarna sker så tätt och det finns en tröghet i såväl transformatorn som dess rum samt att det däremellan aldrig riktigt stängs av, blir temperaturen på luften från transformatorrummet relativt konstant. Loggade mätningar från kalibreringsperioden 7-11 november 2016 visade att temperaturen håller sig kring 25 °C, medan tillufttemperaturen *från* hållplatszonen in i transformatorrummet varierar desto mera.

Transformatorventilationens luftflöden är variabla. Utifrån luftbehandlingsaggregatets loggade reglersignaler i driftövervakningssystemet kunde luftflödena beräknas för den aktuella kalibreringsperioden. De visade sig pendla mellan ca 200 och 350 l/s. I simuleringarna har luftflödena simulerats enligt ett schema som motsvarar vad som loggades.

Baserat på förhållandena under kalibreringsperioden tillför transformatorventilationen ca 2 000 - 3 500 W värme till hållplatsen då värmebehov föreligger. Om värmebehov saknas dumpas värmen genom att den blåses ut, vilket redan nämnts.

Ridåvärmare

Ovanför var och en av de bägge portarna hänger tre ridåvärmare. Luftvärmarna cirkulerar rumsluft utan att tillföra någon friskluft. Av de tre aggregaten är det bara det i mitten (det största av dem) som värmer. De övriga är bara där för att stötta luftstrålen. De värmande mittenaggregaten är tillbyggnadens

huvudsakliga värmekällor för att bl.a. kompensera för portöppningarnas och bussförflyttningarnas kraftiga påverkan på värmebalansen.

Generellt sett är ridåvärmarens primära funktion att begränsa luftutbyte mellan inomhus och utomhus då portar öppnas. Hur effektivt det skyddet är beror på en mängd olika faktorer, såsom "störningarnas" omfattning (vad som rör sig genom porten), temperatur- och tryckförhållanden, geometri, annan ventilation, ridåvärmarens lufthastighet och porthöjd, mm. Tillverkare anger att ridåvärmarnas effektivitet vid ganska gynnsamma förhållanden är ca 70–75 %, dvs. att luftutbytet mellan inne och ute reduceras med given procentsats. Här antas att effektiviteten är 50 %.

Luftridåerna i hållplatsen är inställda på att blåsa ner 450–1000 l/s så länge portarna är öppna + 180 sekunder i eftergångstid. I detta skede beaktas inte rumstemperaturen alls. Luftflödets storlek och temperatur regleras istället proportionerligt i fem steg med utomhustemperaturen. Högst luftflöde fås vid kallt väder och inget flöde alls om det är + 18 °C eller varmare utomhus. Luftstrålens temperatur varierar mellan 31–45 °C.

Då eftergångstiden avslutats går luftridåerna ner i ett lugnare s.k. varmhållningsläge där de reglerar mot ett börvärde för rumstemperaturen. Luftflödet är då konstant 450 l/s. Vid dimensionerande utomhustemperatur (-16 °C) är värmevattnets framledningstemperatur 65 °C. I varmhållningsläget avger då de två portarnas ridåvärmare ca 29 kW vardera.

Eftersom hållplatsen nästan uteslutande värms av ridåvärmarna är de konstant på i varmhållningsläget vid värmebehov under kvällar, nätter och helger.

Simuleringsmetod vid portöppning och eftergångstid

I simuleringarna har luftridåaggregaten delats upp i två enheter vardera. Ett för att hantera portöppning- och eftergångstiden och ett för att hantera varmhållningsläget. Detta eftersom de reglerar mot olika klimat; det förstnämnda mot rumstemperatur, det andra mot utomhustemperatur.

Vid portöppning aktiverar modellen ett ndsluftbehandlingsaggregat av "standardkaratär". Ett per port, där drifttiderna anpassats efter de tidigare nämnda busstiderna och där värmeåtervinningsgraden satts till 100 %. Inblåsningstemperaturen varierar med utomhustemperaturen enligt givna uppgifter från tillverkaren Frico. Luftflödet sattes konstant till 1 000 l/s, alltså utan variation som den verkliga luftridån. I gengäld anpassades inblåsningstemperaturen proportionellt i förhållande till utomhustemperaturen på ett sådant sätt att värmeeffektavgivningen skulle stämma med vad tillverkaren angivit.

Luftridåernas förmåga att förhindra luftutbyte mellan inomhus och utomhus hanterades i simuleringarna genom att bara halva portarean öppnades. Luftridåaggregatet stängdes därför av helt och hållet när porten var öppen. I detta arbete gjordes med andra ord bedömningen att ridåvärmarens värmetillförsel till hållplatsen vid portöppning var noll. Resonemanget i stycket ovan om luftflöde och inblåsningstemperaturer gäller alltså bara eftergångstiden (180 s) som inträder när portarna stängts.

De framtagna klockslagen för portöppningar gjordes om till scheman som lästes in modellen. Ett schema för ankomstporten och ett schema för utfartsporten.

Simuleringsmetod vid varmhållning

Vid simulering av varmhållningsskedet aktiverar modellen s.k. fan-coil apparater. En per port. Apparaternas värmeavgivning reglerades proportionellt mot hållplatsens börvärdestemperatur. I likhet med ridåvärmarna vid portöppning startades och stoppades deras drift enligt inlagda scheman.

IDA ICE har ett antal olika applikationer för fan-coils, ingen av dem helt överensstämmande med det aktuella fallet. Men en av applikationerna gick att använda på ett bra sätt efter ett fåtal ändringar.

Känslighetsanalys för eventuell reception

För den händelse en receptionsdisk kommer placeras i tillbyggnaden har ett antal simuleringar gjorts för att förutsäga hur komforten där skulle kunna bli. Simuleringarna avser en öppen receptionsdisk, dvs. en reception som inte avgränsas med väggar mot hållplatsens övriga delar.

Receptionen kan sannolikt endast placeras i tillbyggnadens lågdel, dvs. i passagezonen. I studien har antagits att en 5 m² stor receptionsdisk placeras relativt nära passagezonenens västfasad i riktning mot ankomstporten. Där skulle den förmodligen vara lättillgänglig för de resande utan att vara i vägen. Vidare har här bedömts att s.k. takvärmepaneler ovanför receptionen är den lämpligaste lösningen. Se motivering nedan.

Takpaneler värmda av el eller vatten?

Kanhända är elvärmda klimathållningssystem oönskade av miljöskäl i organisationens övriga fastighetsbestånd, men i föreliggande fall förordas ändå just detta. Elvärmda takpaneler har nämligen mycket stora fördelar jämfört med vattenvärmda och simuleringresultaten visar att vattenvärmda paneler inte skulle lösa uppgiften under rådande omständigheter.

En av fördelarna med elvärmda paneler kommer sig av att sådana arbetar med betydligt högre yttemperatur (upp till 240 °C vid maximal effekt) jämfört med vattenburna paneler (ca 70 °C vid maximal effekt). Detta ger dem en betydligt högre andel strålningsvärme (ca 85 %), dvs. mer direktriktad värme, än vattenpanelerna. Bland tillverkare anges att elvärmda paneler generellt sett i liknande fall bara behöver halva värmeeffekten och en tiondel av panelarean jämfört med vattenvärmda dito.

Vidare är elvärmda paneler en mer flexibel lösning än ett rördraget alternativ. Att vattenvärmda paneler dessutom behöver högre vattentemperaturer (80/60) än övriga installationer är också ett visst hinder, även om det kan lösas.

Enligt en takvärmeleverantör brukar värmepaneler hängas 2,5 m över golv om inte verksamheten kräver annat. Förslaget på värmepanel från deras sortiment levereras i moduler om 0,29 x 1,68 m² där en modul

max kan avge 2 000 W. Panelernas värmeavgivning regleras i normalfallet proportionellt mot önskat börvärde på lufttemperatur. Referenstemperaturgivare för denna reglering placeras då lämpligen utom ”synhåll” för värmepaneler. Avsikten med ett sådant arrangemang är att givaren ska känna luftens temperatur utan att påverkas av värmestrålningen från panelerna. Som framgår nedan reglerades värmeeffekten vid de redovisade simuleringarna istället med hänsyn till den operativa temperaturen – ett temperaturmått som tar hänsyn till både luftens temperatur och de omgivande ytornas, inklusive värmepanelernas, temperatur.

Simuleringsmetod

I simuleringsprogrammet IDA ICE saknas applikationer för takvärmepaneler. Ett alternativ för att komma runt detta faktum skulle kunna vara att modellera elvärmd golvvärme i ett bjälklag för en ovanpåliggande zon. Bjälklaget skulle i så fall ges låg värmetröghet för att inte skapa onödigt långsamma reglerförlopp. Men värmeregleringen mot en börvärdestemperatur för en sådan lösning skulle förmodligen bli något krånglig eftersom golvvärmen ursprungligen är avsedd att värma sin egen zon. I denna studie valdes istället ett alternativ där takvärmen utgörs av belysning.

En fördel med belysningslösningen är att lampor i IDA ICE alltid hamnar i nivå med undertaket. Eftersom passagezonens undertak är 3,8 m över golv behövde dess tak sänkas över receptionen. För att hantera detta delades passagezonen in i fyra zoner. En receptionszon på 5 m², en liten zon väster om receptionen mot västfasaden samt en större zon öster om receptionen. De två sistnämnda gavs höjden 3,8 m som tidigare, medan receptionszonen gavs höjden 2,5 m. Den fjärde zonen ovanpå receptionen, dvs. mellan 2,5 m och 3,8 m över golv. På så vis kunde receptionszonen få en värmande belysning på 2,5 meters höjd.

För att undvika inverkan av värmetröghet från det inlagda bjälklaget ovanför receptionen gjordes det millimetertunt och i aluminium.

Upplevd komfort

Utöver rumslufttemperatur kan IDA ICE beräkna fram uppgifter om termisk komfort, såsom operativ temperatur och PPD-index i en zon. Beroende på var i zonen en fiktiv person placeras fås olika resultat. I denna studie placerades personen centrerat under de rektangulära takvärmepanelerna.

PPD-index, som anger förväntad andel personer som skulle vara missnöjda med den termiska komforten, påverkas av den fiktiva personernas klädsel och fysiska aktivitet. Den fiktiva receptionistens fysiska aktivitetsnivå ansåts till 1,0 Met vilket motsvarar en värmeavgivning på lite drygt 100 W (sensibel + latent värme). Vidare antogs att receptionistens klädsel motsvarar 1,0 Clo, vilket innebär långbyxor, skjorta och kavaj eller tröja. Även receptionistens huvudhöjd över golv vid arbetsställning används vid beräkning av komfort. Här ansattes måthöjden 1,5 m.

Reglering av värmeavgivning från panel

Belysningsapplikationen i IDA ICE är givetvis inte främst avsedd att värma med, vilket gör att den i sitt grundutförande saknar reglermöjlighet för värmeavgivning. Men med ett relativt enkelt makro kan

modellens belysningsvärme fås att reglera mot ett börvärde för valfri komfortparameter. Eftersom receptionisten här antas reglera värmeavgivningen relativt ofta och noga för bästa möjliga komfort, gjordes makrot PI-reglerat med avseende på operativ temperatur 21 °C.

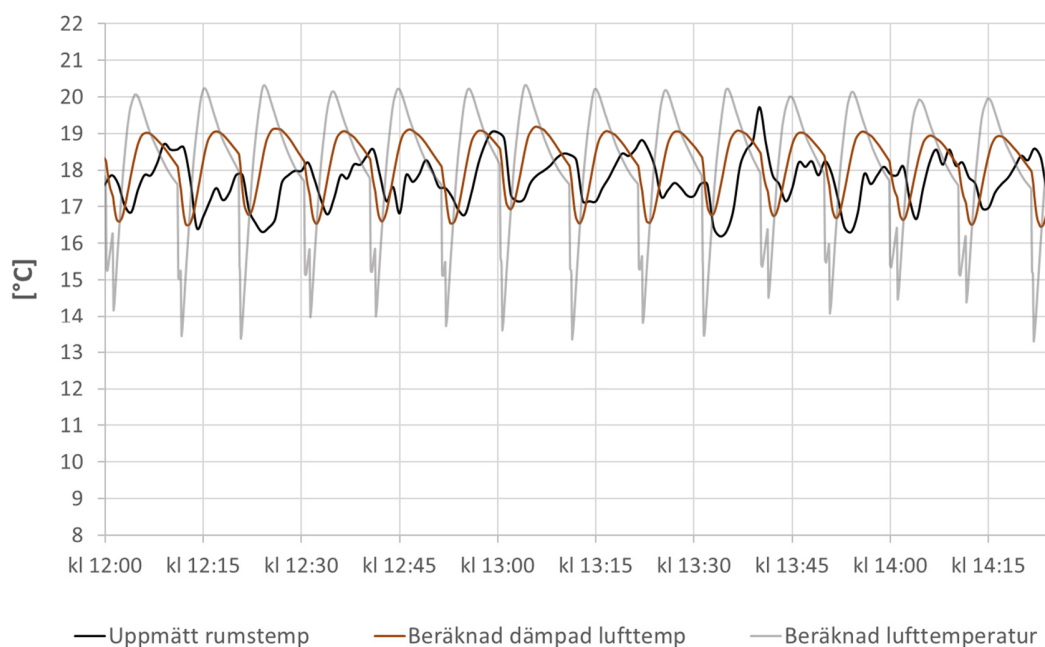
Resultat – kalibrering av modellen

För att kalibrera modellen krävdes ett antal simuleringar. Efter respektive simulering för kalibreringsperioden fördes resultaten för lufttemperatur, operativ temperatur och invändig glastemperatur över till ett framtaget analysverktyg i Excelmiljö. Där kunde jämförelser göras mellan uppmätta och beräknade värden i grafer och tabeller.

Eftersom temperaturer i IDA ICE redovisas utan verkliga mätarens värmetröghet (tidskonstant), har framräknade värden efterbehandlats matematiskt för att bättre efterlikna verkligheten. Mätinstrumenttillverkarnas angivna tidskonstant hanterades i modellen genom att beräknade lufttemperaturer och operativa temperaturer dämpades med en matematisk funktion av första ordningen. På så vis blev de uppmätta resultaten jämförbara med de beräknade.

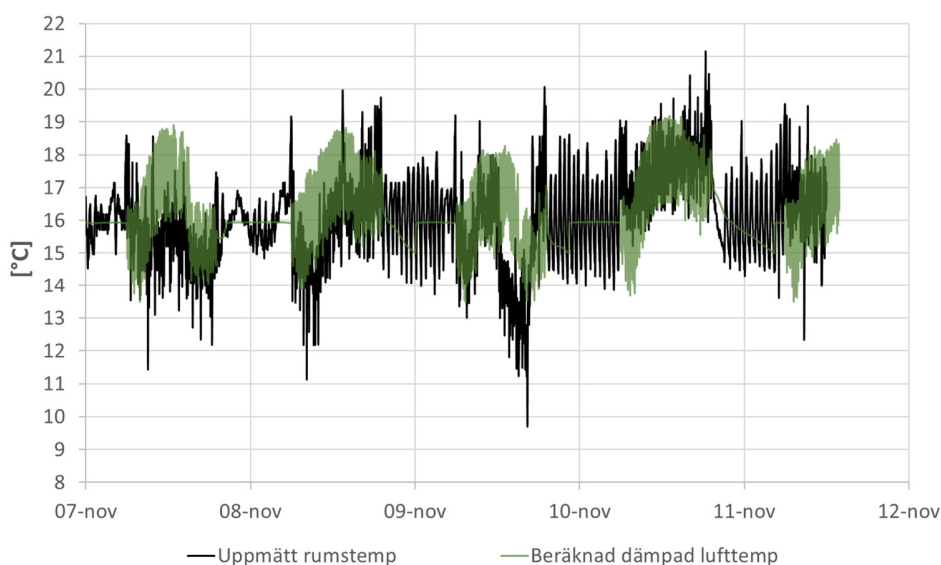
Tidskonstanten (63 %) för lufttemperatur sattes till 120 sekunder och till 200 sekunder för operativ temperatur.

I Figur 10.3 framgår att amplituden för den beräknade rumslufttemperaturen reduceras märkbart av den matematiska dämpningen.



Figur 10.3 Rumslufttemperaturer i hållplatsen den 10 november 2016.

I det följande visas separata grafer över lufttemperatur, operativ temperatur och glastemperatur för kalibreringsperioden 7–11 november. I varje graf ryms såväl uppmätta som beräknade dämpade temperaturer. Som tydligt framgår är modellen kalibrerad för dagtid med busstrafik. Att det stämmer sämre övrig tid beror sannolikt på att den verkliga luftridåns varmhållningsfunktion är mer ”på/av” till sin karaktär än den i modellen. Detta simuleringsmässiga tillkortakommande bedöms dock här vara försumbart för betraktelser dagtid eftersom det då händer så mycket annat i tillbyggnaden att varmhållningsfunktionens reglerkvalitet inte hinner få något genomslag på temperaturerna, vare sig i verkligheten eller modellen.

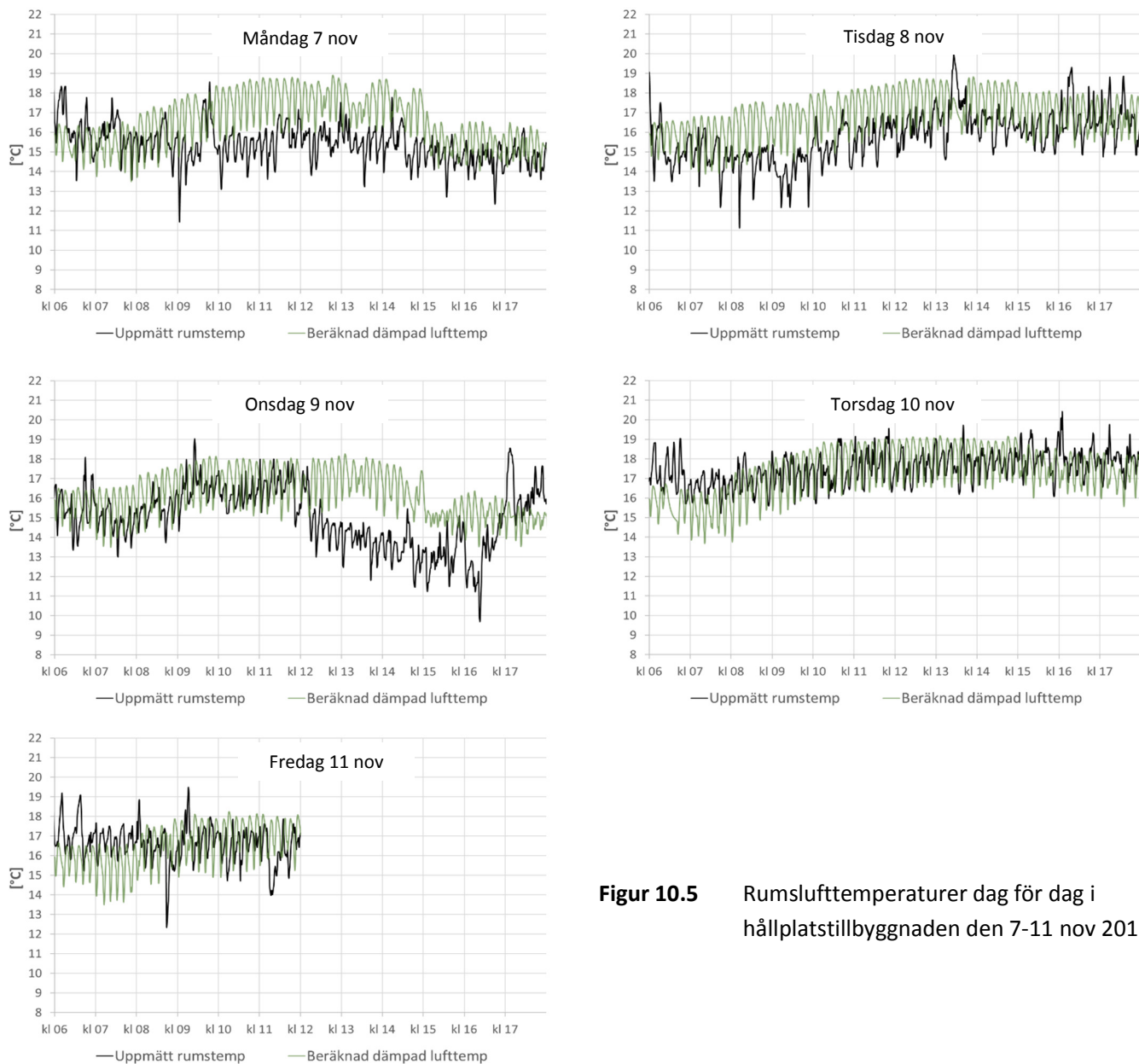


Figur 10.4 Rumslufttemperaturer i hållplatstillbyggnaden, 7–11 november 2016.

Figur 4 synliggör ett dilemma, nämligen att modellen inte kan nå överensstämmelse med uppmätta värden under hela kalibreringsperioden. Den beräknade rumslufttemperaturen är något högre än önskvärt under måndagen och tisdagen, medan den är väldigt överensstämmande eller möjligtvis något svalare än önskvärt under torsdagen och fredagen. Eftersom modellen bör vara konsekvent med avseende på de grundläggande förutsättningarna såsom klimatskalets egenskaper, byggnadens geometri, börvärden för rumstemperatur, mm kan den inte kalibreras på ett allt igenom optimalt sätt för respektive tillfälle. Helheten går före individen, dvs. kalibreringsperiodens helhet är viktigare än ett enskilt dygn.

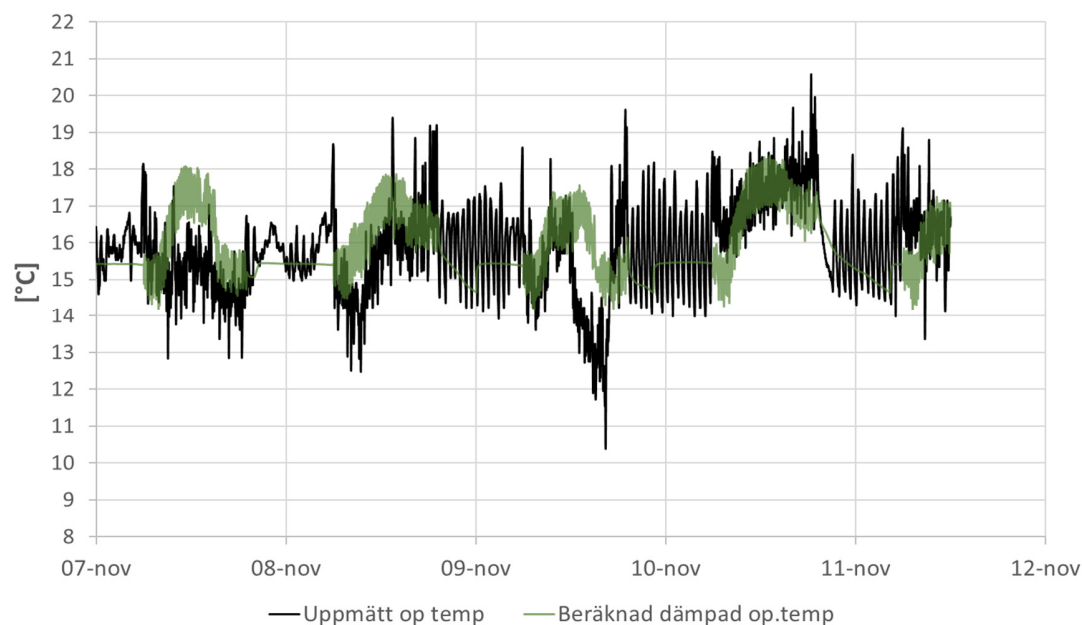
Vad gäller onsdagen den 9/11 visar förmiddagen relativt god överensstämmelse med verkligheten, men efter lunch sjunker den uppmätta temperaturen drastiskt. Vad den tillfälliga temperaturminskningen beror på är inte klarlagt. Onsdagens väder är inte väsentligt annorlunda på eftermiddagen jämfört med förmiddagen. Eftersom portarna har den största inverkan på klimatet i hållplatstillbyggnaden ligger det nära till hands att misstänka att sänkningen kan sättas i relation till dem. Kanske har bägge portarna av

någon anledning varit öppna samtidigt flera gånger i rad under eftermiddagen eller så kanske någon av dem inte stängdes helt. Men det är bara spekulationer.



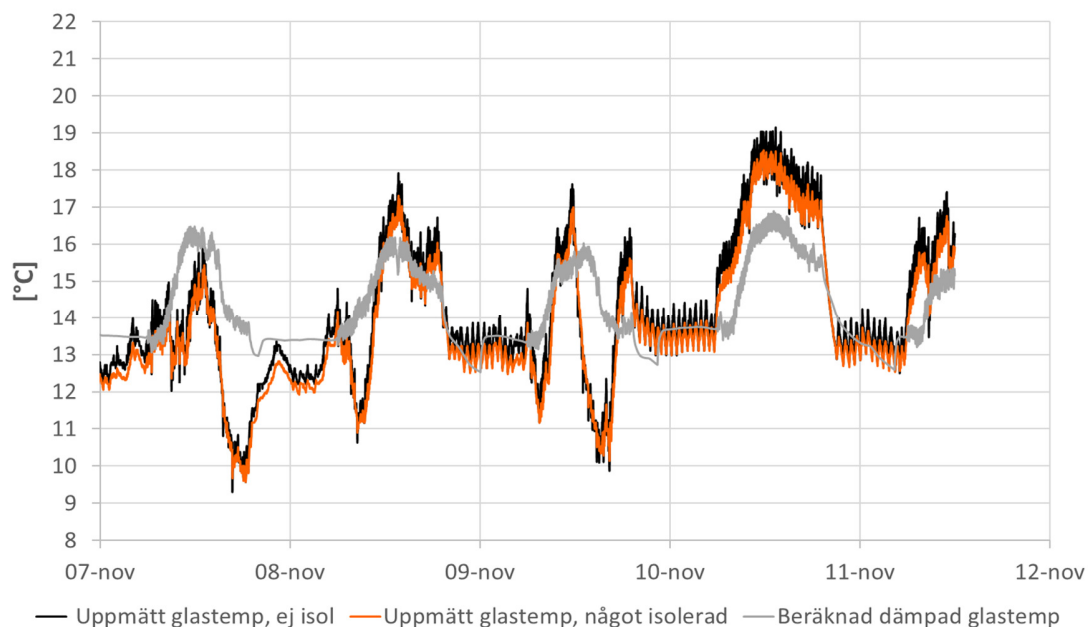
Figur 10.5 Rumslufttemperaturer dag för dag i hållplatstillbyggnaden den 7-11 nov 2016.

Den operativa temperaturen följer på det stora hela samma mönster som lufttemperaturen, men amplitudhöjden är lägre dagtid. Ytornas värmetröghet ger en dämpande effekt på den operativa temperaturen.



Figur 10.6 Operativa temperaturer i hållplatstillbyggnaden, 7–11 november 2016.

Vad gäller glastemperatur mättes den med två olika temperaturgivare. Givarna var identiska och bägge tejpades fast mot glasytan, men i det ena fallet kompletterades tejpens med 5 mm skumplastisolering.



Figur 10.7 Invändiga glastemperaturer i hållplatstillbyggnaden, 7–11 november 2016.

Glas är tungt och värmetrögt. Därför är glasets temperatursvängningar i Figur 10.7 betydligt mindre än för lufttemperaturen och den operativa temperaturen.

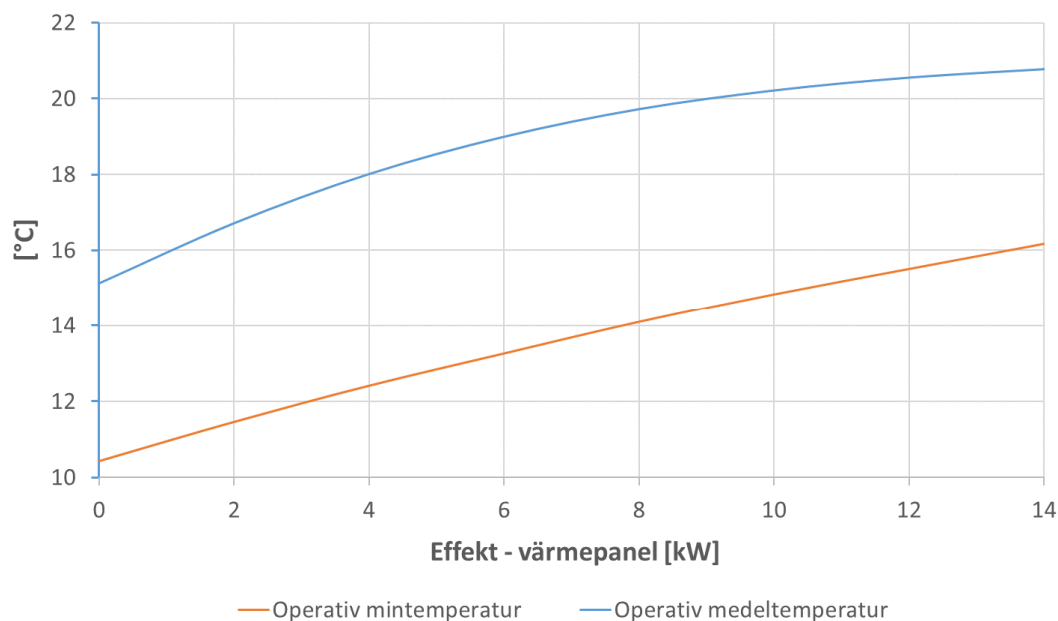
Stora delar av den glasade fasaden mot norr och en liten del mot söder täcks invändigt av träribbor. Om de huvudsakligen är där av estetiska eller solvärmedämpande är oklart men deras inverkan på den inkommande solenergi är mycket begränsad. Jämfört med övriga värmebalanspåverkande förhållanden i hållplatstillbyggnaden är de faktiskt helt försumbara, åtminstone under kalibreringstiden 7–11 november 2016 som innefattade två soliga dagar med låg solvinkel.

Resultat – komfort i öppen reception

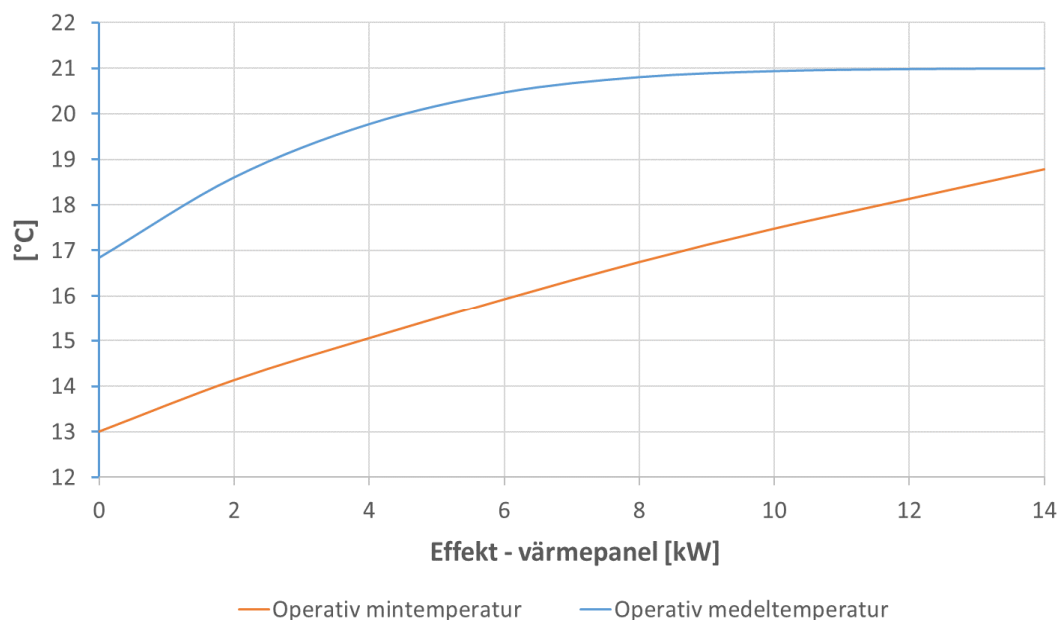
Utan extra värmning av den tilltänkta öppna receptionen skulle den operativa temperaturen där bli allt för låg (PPD-index högt.) Det skulle med andra ord upplevas för kallt för stillasittande receptionspersonal utan förstärkt klädsel. För att råda bot på det föreslås att receptionen värms av takvärmemoduler med hög andel strålningsutbyte.

I det sammanhanget är operativ temperatur och PPD-index de mest lämpliga måtten för att värdera det termiska klimatet i receptionszonen. I bl.a. Figurerna 10.8 och 10.9 framgår att det termiska klimatet skulle bli undermåligt utan extravärme. Figur 10.8 avser ett dimensionerande s.k. syntetiskt vinterdygn i Göteborg. Utomhustemperaturen pendlar då enligt en sinusformad kurva mellan -12 °C och -16 °C, medan Figur 10.9 avser kalibreringsperioden 7-11 november 2016 då den uppmätta temperaturen pendlade mellan +1 °C och -5 °C.

I analysen ökades värmeeffekten i steg om 2 kW eftersom de aktuella takmodulerna enligt tidigare har den maxeffekten vardera.



Figur 10.8 Beräknade operativa temperaturer för en tilltänkt reception i hållplatstillbyggnaden ett dimensionerande syntetiskt vinterdygn ($-16\text{ °C} < t_{\text{ute}} < -12\text{ °C}$) under receptionens öppettider. Värmepaneler i steg om 2 kW på 2,5 m höjd över golv.



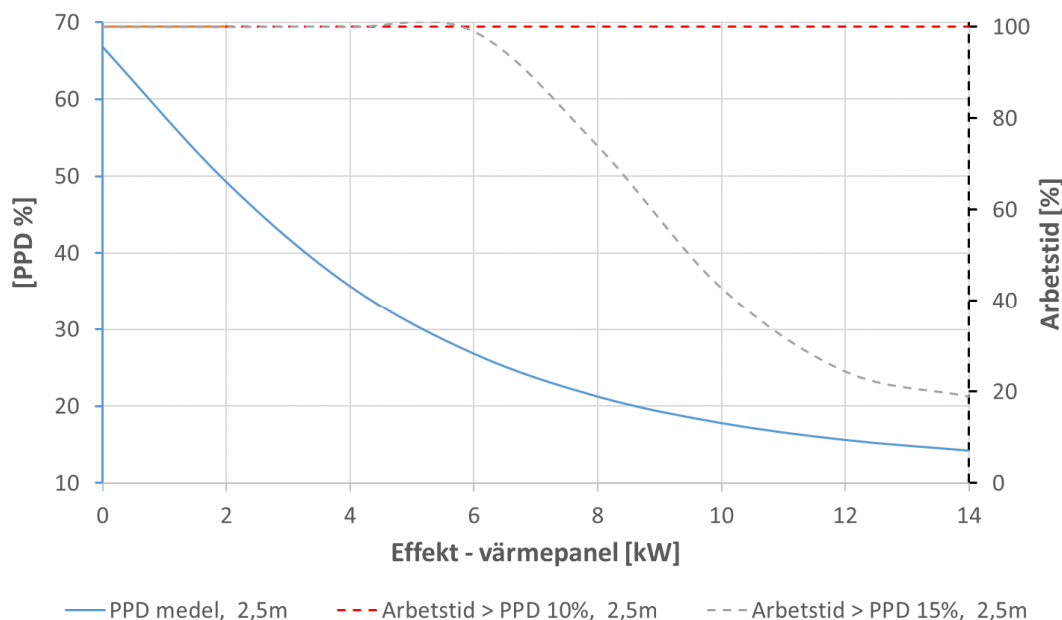
Figur 10.9 Beräknade operativa temperaturer för en tilltänkt reception i hållplatstillbyggnaden under den 7–11 november 2016 ($-5\text{ °C} < t_{\text{ute}} < 1\text{ °C}$) under receptionens öppettider. Värmepaneler i steg om 2 kW på 2,5 m höjd över golv.

Om en operativ medeltemperatur på 21 °C är ett acceptabelt mål att sträva mot, visar resultaten i Figur 10.8 att 14 kW panelvärme behöver installeras. Detta motsvarar 7 st. elvärmda moduler, vilket är max vad som får plats över receptionszonen. Ytterligare moduler skulle främst värma ytor utanför receptionen.

Men -12 till -16 °C inträffar inte ofta i Göteborg. Om dimensionering istället görs för bara några få minusgrader, såsom under kalibreringsperioden där utomhustemperaturen i medel var -1,5 °C, då visar Figur 10.9 att 10 kW installerad värmeeffekt vore tillräckligt förutsatt att en operativ medeltemperatur på 21 °C är acceptabelt.

Men trots en så hög installerad värmeeffekt som 10 kW skulle det finnas gott om tillfällen då den operativa temperaturen tillfälligt skulle bli betydligt lägre än börvärdet (se sammanställningen i Figur 10.12 senare).

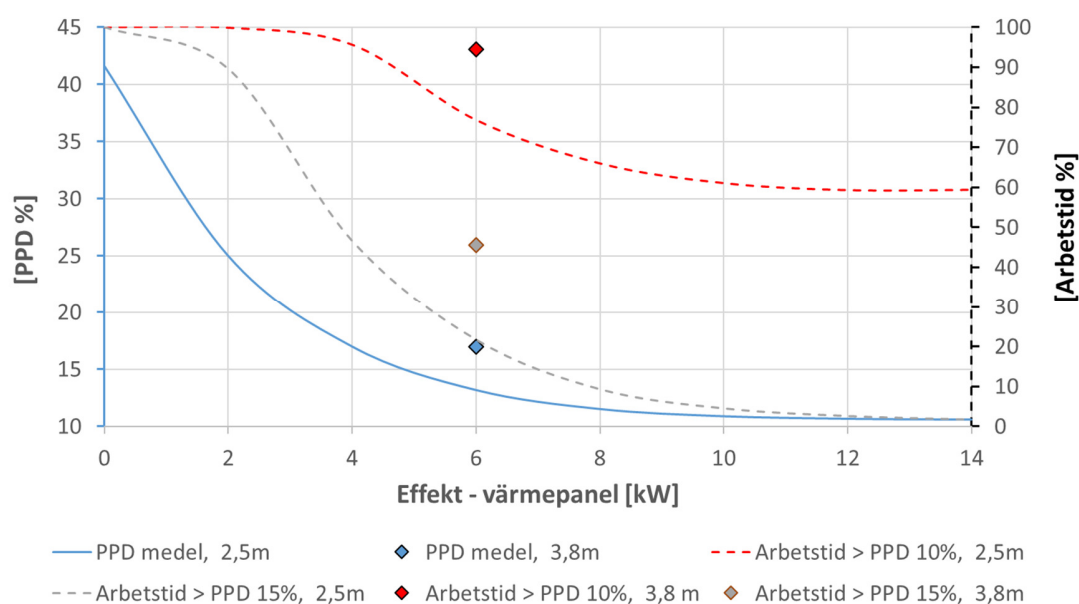
I Figur 10.10 visas resultat för motsvarande analys men relaterat till PPD-index ett dimensionerande syntetiskt dygn. Den heldragna blå grafen representerar medelvärde för PPD-index i relation till installerad värmeeffekt medan de streckade graferna representerar procentuell andel av arbetstiden då PPD-index är högre än 10 % respektive 15 %. PPD-index avläses mot den vänstra vertikala axeln, medan andel arbetstid med otillfredsställande termisk komfort avläses mot den högra.



Figur 10.10 Beräknad operativ temperatur och PPD-index i receptionen ett dimensionerande syntetiskt vinterdygn ($-16\text{ °C} < t_{\text{ute}} < -12\text{ °C}$). Värmepaneler på 2,5 m höjd.

Den streckade röda grafen för arbetstid då PPD-index är $> 10\%$ är 100% för alla installerade värmeeffekter i Figur 10.10, vilket skall uttydas som att komforten aldrig är så bra som PPD-index 10% motsvarar. Däremot visar den gråstreckade grafen att finns det gott om arbetstid då PPD-index är $10 - 15\%$ om tillräckligt hög effekt installeras. Om exempelvis 14 kW installeras skulle "bara" 20% av arbetstiden ha en sämre komfort under det dimensionerande vinterdygnet än motsvarande PPD-index 15% .

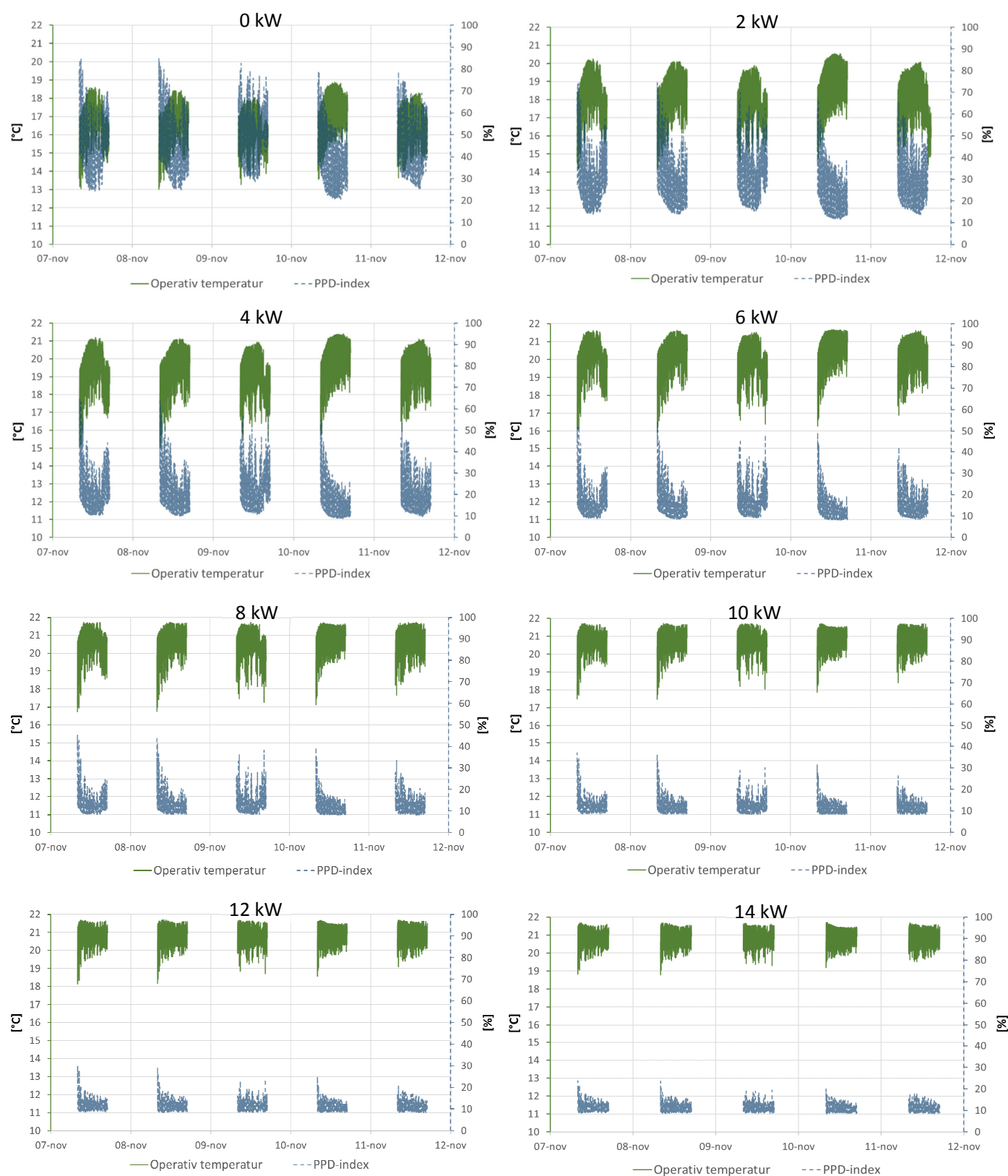
Om istället kalibreringsperioden 7-11 november 2016 analyseras fås resultat enligt Figur 10.11, där även tre singelvärden framträder som små kvadrater. Dessa solitärer visar hur det skulle förhålla sig om 3 värmepaneler (här 6 kW) istället skulle installeras $3,8\text{ m}$ över golvet.



Figur 10.11 Beräknad operativ temperatur och PPD-index i receptionen (utan panelmoduler) 7-11 november 2016 ($-5\text{ }^{\circ}\text{C} < t_{\text{ute}} < 1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Medelvärde för PPD-index går successivt ned mot målvärde 10% , men efter 10 kW installerad maxeffekt sker ingen ytterligare förbättring (minskning) av medelvärde för PPD-index. Utplaningen efter 10 kW gäller även den procentuella andelen av arbetstid då PPD-index är bättre än 10% (grå streckad) respektive 15% (röd streckad).

Figurerna 10.9 och 10.11 kan sägas vara sammanfattningar av händelseförloppen i Figur 10.12 där operativ temperatur och PPD-index plottats med hög tidsupplösning för perioden 7-11 november. I Figur 10.12 avläses operativ temperatur åt vänster och PPD-index åt höger.



Figur 10.12 Operativ temperatur och PPD-index i receptionen för olika installerade maximala värmeeffekter från takpaneler ovanför reception (2,5 m höjd). Klimat: 7–11 nov 2016.

11. Resultat – energi

Simuleringarna visar att busshållplatsens totala värmeenergibehov är ca 110 MWh/år, men det köpta fjärrvärmebehovet är ca 66 MWh/år. Skillnaden beror på överskottsvärme från transformatorstationen som tillförs via ventilationsluften till hållplatsen. Summorna är normalårskorrigerade med s.k. energiindex². Beräkningsresultaten bekräftas av mätningar gjorda under en begränsad period 2017, se nedan.

Jämfört med kraven i Boverkets byggregler för lokaler i Göteborg är den framräknade energianvändningen mycket hög. Eftersom hållplatstillbyggnadens golvarea är ca 145 m² får den ett specifikt värmebehov på ca 450 kWh/m² (enbart köpt fjärrvärme). Detta kan sättas i relation till de ny- och tillbyggnadskrav på 65 kWh/m² (värme + fastighetsel) som gällde då busshållplatsen uppfördes. Hållplatstillbygget uppfördes dock med s.k. tidsbegränsat bygglov där byggnadsnämnden i Göteborg ansåg att kraven på energiprestanda inte behövde beaktas.

För den händelse en elvärmd reception förläggs i hållplatstillbyggnaden enligt tidigare, reduceras behovet av köpt fjärrvärmeenergi med ca 2 MWh/år eftersom den öppna receptionens komfortvärme också skulle komma övriga hållplatsen till godo. Däremot skulle takvärmepanelerna behöva ca 5,5 MWh/år, vilket nästan motsvarar behovet av el för värme och drift i en normalstor nybyggd elvärmd villa i Göteborg.

Tabell 10.1 Behov av köpt energiindexkorrigerad energianvändning i hållplatstillbyggnaden

	Köpt fjärrvärme	El för värme
Utan reception	66 MWh/år	-
Med reception	64 MWh/år	6 MWh/år

Rimlighetsbedömning och jämförelse med uppmätt fjärrvärmeanvändning

Busshållplatsen är en tillbyggnad till huset Patricia som har en uppvärmda golvarea på ca 7 600 m². Med kännedom om skillnaden mellan Patricia-byggnadens värmeenergianvändning innan och efter busshållplatsens tillkomst skulle då tillbyggnadens energianvändning kunna kvantifieras ”på ett ungefär”. Tyvärr delar dock Patricia värmemängdsmätare med ytterligare en byggnader i samma storleksordning, vilket gör att busshållplatstillbyggnadens värmeenergianvändning i någon mån suddas ut. Vidare finns det frågetecken inför värmestatistiken för 2017 eftersom värdena varierar ganska kraftigt mellan 2016 och 2017. Detta sammantaget gör att debiteringsmätaren bortses från i detta sammanhang.

Det bästa hade varit statistik från en separat värmemängdsmätare bara för busshållplatstillbyggnaden. En sådan installerades förvisso i januari 2017, men den fallerade tyvärr redan i mars samma år. Den värmeenergianvändning som trots allt mättes innan mätaren havererade var totalt ca 18 MWh för

² Energi-Index tar hänsyn till den sammantagna effekten av temperatur, sol och vind i kombination med byggnaders läge, egenskaper och användningssätt. Uppgifter för aktuella orter erhålls från SMHI.

perioden januari till februari 2017, vilket är ungefär det samma som simuleringarna visade för januari och februari 2016. Om de uppmätta värdena omräknas i proportion till resten av året med avseende på utomhustemperatur och dessutom normalårskorrigeras med s.k. energiindex fås en köpt fjärrvärme-energianvändning på ca 70 MWh/år, vilket stämmer ganska väl med det simulerade köpta fjärrvärmebehovet på 66 MWh.

Den simulerade resultaten anses här därmed styrkta.

12. Slutsatser

Den utförda kalibreringen mot uppmätta värden visar att det med ett bra och dynamiskt modelleringsverktyg går att simulera byggnader med god tillförlitlighet även om händelserna i den är snabba, frekventa och drastiskt värmebalanspåverkande. Noggrannhet i indata och hög tidsupplösning för de olika händelseförloppen är dock en förutsättning. Vid den typen av simuleringar är klimatskalets egenskaper och utformning generellt sett av mindre betydelse jämfört med de föränderliga händelserna i modellen och dess klimathållningssystem.

Beträffande värmning av en eventuell öppen reception visar analysen att det faktiskt går att få en tillfredställande komfort under de givna omständigheterna, förutsatt att receptionisten accepterar ett icke-statiskt klimat liknande det i typiska kontorsmiljöer. Dimensioneringsanalysen visar vidare indirekt att elvärmda takpaneler sannolikt är den enda rimliga lösningen eftersom de är högt tempererade. Alternativet med vattenvärmda takpaneler skulle ta alldeles för stor plats och inte förslå eftersom den stora panelarean bl.a. skulle hamna utanför receptionens zon och då inte längre bidra till att värma den lika effektivt.

Ur ett energiperspektiv vore en reception i hållplatstillbyggnaden olycklig. Åtminstone med den öppna lösningen som här förutsatts. Att behovet av köpt el ökar med 6 MWh/år är anmärkningsvärt med tanke på receptionens ringa storlek, dessutom kan skiftet av energislag från fjärrvärme till el betraktas som negativt ur ett policy-perspektiv i många organisationer.

Huruvida takpanelernas höga eleffekttoppar påverkar tillbyggnadens effekttaxa är inte undersökt, men det är sannolikt försumbart jämfört med den eleffekt laddning av elbussen fordrar.

13. Idéer till alternativ hållplatsutformning

Den aktuella lösningsprincipen på Lindholmen skulle kunna förbättras på några punkter.

- Det vore en fördel att sommartid kunna vädra med automatiskt styrda högt belägna fönster, istället för att som idag ställa upp portar och dörrar.
- Luftflödet i det luftbehandlingsaggregat som försörjer lokalen med förvärmad och filtrerad uteluft skulle med fördel kunna behövsstyras exempelvis med hänsyn till inomhusluftens koldioxidkoncentration. En mycket stor del av tiden skulle fläktarna kunna varvas ned avsevärt utan att luftkvaliteten eller inomhusmiljön i övrigt skulle försämrast.
- Med hjälp av strålningsvärmare skulle ett avgränsat område där personer sitter stilla med tunnare klädsel kunna ges en högre operativ temperatur vintertid än hållplatslokalen i övrigt. Denna teknik kan utnyttjas om man skulle bygga en reception där personal ska kunna vistas utan förstärkt klädsel. Som berörts i föregående avsnitt innebär emellertid en sådan lösning ett ökat behov av elenergi.

Genom att reducera eller eliminera det kraftiga luftutbyte som uppstår när bussar passerar hållplatsen skulle ett jämnare inomhusklimat kunna hållas i hållplatslokalen. Lösningen för att åstadkomma detta är att avstå från att köra in bussen i lokalen. Istället skulle man utnyttja en traditionell lösning likt den man finner på många resecentra, där bussarna kör intill hållplatsbyggnaden. En vanlig lösning är att bussarna kör fram till hållplatsbyggnaden och passagerarna når bussen via skjutdörrar och går under ett skärmtak en kort sträcka för att gå ombord på bussen. När bussen ska köra vidare måste den backa bort från byggnaden.

En annan variant som skulle fungera som ett alternativ till lösningen på Lindholmen är att bussen kör intill byggnaden, längs med byggnaden. Bussen kör alltså inte in i byggnaden. Hållplatslokalen skulle kunna nås via skjutdörrar. När bussen ska vidare fortsätter den framåt, precis som idag, men med skillnaden att inga portar passeras. Ett problem vid en sådan utformning uppstår i och med att det kan förekomma att hållplatsen trafikeras av olika bussmodeller med olika geometri. Speciellt placeringen av bussens dörrar påverkar förstås var/hur hållplatsbyggnadens dörrar/portar kan placeras. En sådan lösning skulle alltså inte nödvändigtvis innebära en förenkling, men den skulle innebära en reduktion av luftutbytet, värmeeffektbehovet och elenergianvändningen.

BILAGOR

Bilaga 1. Mätinstrument

Temperaturer och termiskt klimat

- Brüel & Kjaer 1213 inneklimatanalysator
- SWEMA 3000 med termoelement och varmtrådsanemometer SWA31
- Intab TinyTag temperaturloggers
- Globtemperaturgivare – Intab Tinytag
- Flir One värmekamera

Spärgasmätningar och koldioxid

- Brüel & Kjaer 1302 – Multi gas monitor, fotoakustisk spektroskopi
- Koldioxidgivare – IR-instrument

Partikelkoncentrationer

- MetOne 3313 – Optisk partikelräknare, 0,3 till större än 10 µm
- Mini-WRAS 1371, Mini Wide Range Aerosol Spectrometer, 0,01 till 35 µm

Bilaga 2. Mall för intervjuer/enkät

Datum: _____ Klockslag: _____

Frågor till resenärerna om inomhushållplatsens klimat

1. Vad anser du om temperaturen på inomhushållplatsen nu?

Väldigt kallt	Kallt	En aning svalt	Neutral	En aning varmt	Varmt	Väldigt varmt

2. Hur upplever du kvaliteten på det termiska klimatet?



3. Hur vill du att temperaturen skulle ändras



4. Vilken klädsel stämmer bäst ut värmesynpunkt med det du har på dig nu?

 Kortbyxor/kjol Kortärmat	 Långbyxor Kortärmat	 Långbyxor Långärmat	 Långbyxor Kavaj, tröja eller likn.	 Ytterkläder
--	---	---	--	--

5. Övriga uppgifter

Kön: ☐ Man☐ KvinnaVad gör du här? ☐ Väntar på bussen☐ Har just gått av bussen☐ Annat

Denna enkät är en del av ett forskningsprojekt vid Avdelningen för installationsteknik, Chalmers. Frågor besvaras av docent Lars Ekberg: lars.ekberg@cit.chalmers.se, 0703-15 11 55.

Tack för din medverkan !

Date: _____ Time: _____

Questions regarding the indoor climate at the indoor bus stop

1. What do you think about the temperature at the indoor bus stop at the moment?

Very cold	Cold	Slightly cool	Neutral	Slightly warm	Warm	Very warm / hot

2. How do you judge the quality of the thermal environment?

3. How would you like the temperature to change?

4. What type of clothing corresponds best with that you are wearing now – from a thermal perspective?

Shorts/skirt Short sleeves	Trousers Short sleeves	Trousers Long sleeves	Trousers jacket, sweater or similar	Outdoor clothing
---------------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	--	-------------------------

5. Supplemental information

Gender: ☐ Male ☐ Female

Why are you here? ☐ Waiting for the bus ☐ Just got off the bus ☐ Other

This questionnaire survey is part of a research project at the Division of Building Services Engineering, Chalmers University of Technology. For more information please contact associate professor Lars Ekberg: lars.ekberg@cit.chalmers.se, 0703-15 11 55.

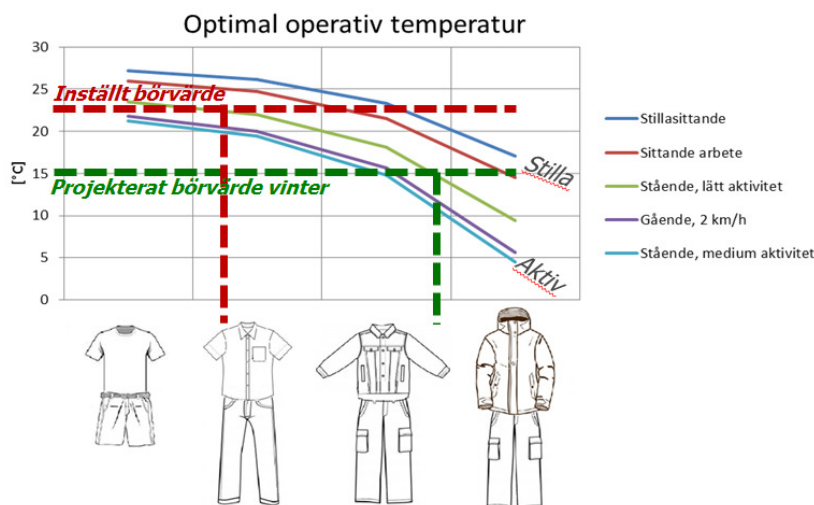
Thank you for your contribution !

Kommentarer till frågeformuläret

Fråga nummer ett är formulerad för att stämma överens med den metod som preciseras i standarden SS-EN ISO 7730, vilket är detsamma som Prof. Fangers s.k. komfortekvation. Fråga nr 1 har en gradering av uppfattningen om klimatet längs en sjugradig skala. Längst till vänster återfinns "Väldigt kallt" som motsvarar PMV/AMV-indexet -3. Längs till höger "Väldigt varmt" som motsvarar indexet +3. Mitteläget på skalan kallas "Neutralt" vilket innebär att man varken vill ha det varmare eller kallare. Detta motsvarar PMV/AMV-indexet ± 0 . Frågorna 2 och 3 är "stödfrågor" som ligger utanför metoden i SS-EN ISO 7730.

Fråga nr 4 gäller personens klädsel. Markeringen längst till vänster motsvarar CLO-värdet 0,3. Nästa markering motsvarar CLO-värdet 0,5, vilket ofta anses representera typisk sommarklädsel. Markeringen i mitten avses representera ett CLO-värde på 0,7. Markeringen näst längst till höger motsvarar CLO-värdet 1,0, vilket ofta anses representera typisk inomhusklädsel vintertid. Markeringen längst till höger innebär ytterkläder eller kraftigt förstärkt inomhusklädsel med CLO-värdet 1,4.

I Figur B2.1 återges ett diagram som togs fram i samband med projekteringen av hållplatsen. Tanken är att illustrera antagandet att det vore eftersträvarsvårt att hålla en inomhustemperatur på ca 23°C sommartid och 15°C vintertid – i båda fallen med hänsyn till förväntad klädsel hos resenärerna tillsammans med antagandet att den som uppehåller sig på hållplatsen har en aktivitetsnivå som motsvarar stående, lätt aktivitet. Diagrammet grundas på SS-EN ISO 7730, som omnämns ytterligare i kapitel 9 - *Upplevd termisk komfort*.

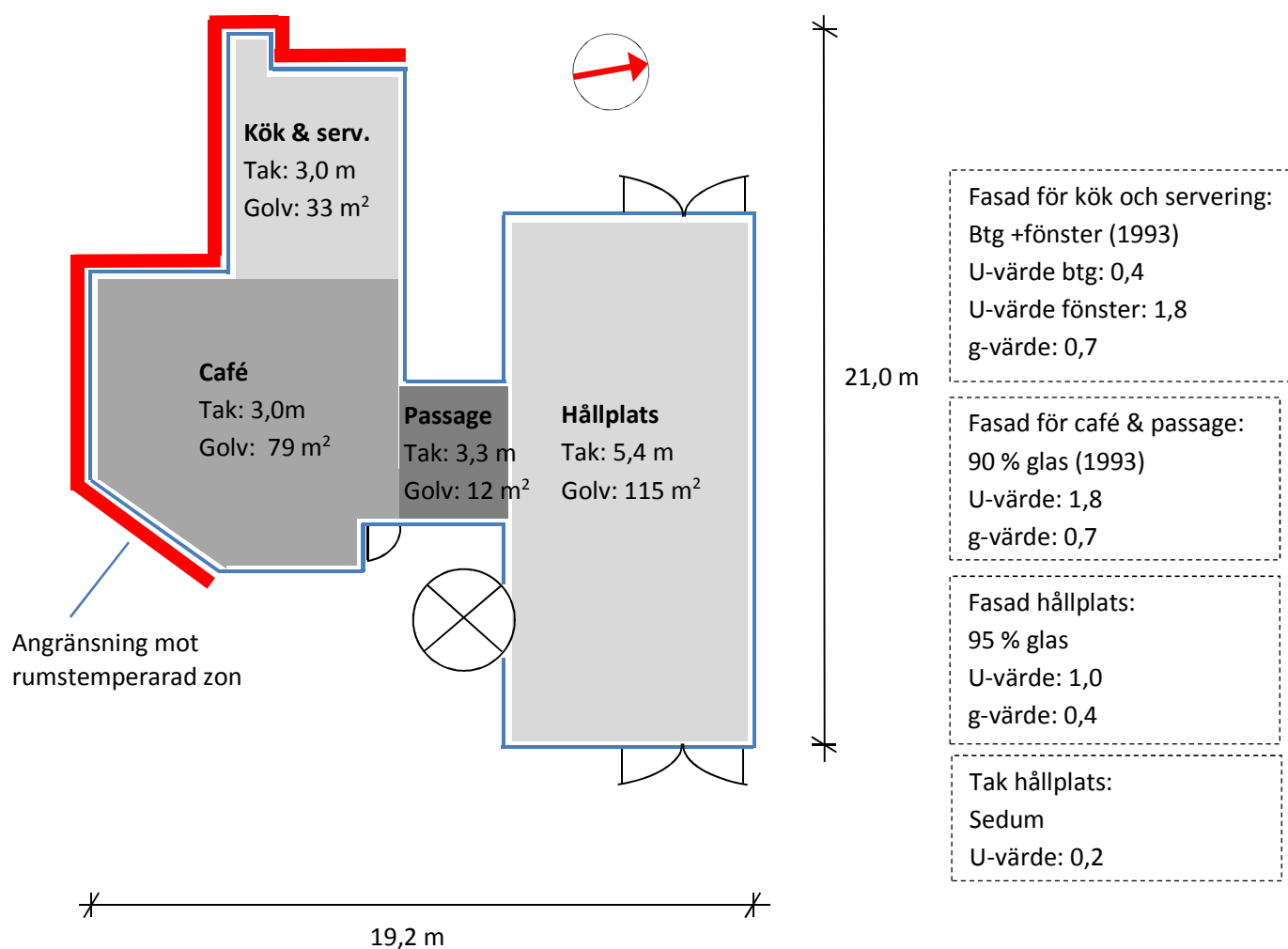


Figur B2.1 Önskad/behaglig operativ temperatur vid olika typ av klädsel och olika nivå på den fysiska aktiviteten. Operativ temperatur är en sammanvägning av inverkan av konvektion och värmestrålning; ett mått som tar hänsyn både till den luftens temperatur och till de omgivande ytornas temperatur. I figuren har projekterat börvärde vintertid markerats med grön streckad linje; 15°C. Vid den temperaturen kan majoriteten förväntas vara nöjda om man vid stående lätt aktivitet bär "förstärkt klädsel". Vid det inställda börvärdet, 23°C, kommer de flesta att vilja lätta avsevärt på klädseln. Data har hämtats från standarden SS-EN ISO 7730.

Bilaga 3. Urval av indata för hållplatsmodellen

Mått och U-värden

Källa: Mått delvis från arkitektens ritning och delvis egna mätningar. U-värden är egna antaganden.



Internvärme

Källa: Egna antaganden.

<u>Kök&servering</u>		
-Personer	2 pers	vardagar 7-19
-Belysning	330 W	vardagar 7-19
-Apparater	500 W	
<u>Café</u>		
-Personer	4 pers	vardagar 7-19
-Belysning	790 W	vardagar 7-19
-Apparater	0	
<u>Passage</u>		
-Personer	0	
-Belysning	100 W	vardagar 6-19
-Apparater	0	
<u>Hållplats</u>		
-Personer	Se "personer i hållplats"	
-Belysning	1150 W	vardagar 6-19
-Apparater	Se "internvärme från buss"	
- Fukttillskott	0,001 kg/s	alltid

Internvärme från buss

Källa: Mått på ytor och klimatkylsystemets maxkapacitet är från datablad från Volvo. Resten är egna betraktelser och antaganden.

Chassi

Ytor: 130 m² (varav 40 m² fönster och 90 m² övrigt)

Antaganden:

- Fönsteryta har en temperatur mittemellan utomhustemperatur och 20 °C.
- Övrigt har samma temperatur som utomhusluft.
- Temperaturen inne i hållplatsen är 20 °C
- Bussens temperatur är konstant under de 6 min den står i hållplatsen.
- Ovanstående antagande kompenseras av att vi antar ett lågt värmeövergångstal; 2 W/m²K

Motorvärme

Antaganden:

- Motorer väger 500 kg är gjorda av stål och svalnar 5 °C under tiden bussen står i hållplatsen

Bussens AC-system

Bussens klimatkylsystem har en maxkapacitet på 27,5 kW.

- En varm sommardag inne i hållplatsen går systemet på 75 % av sin kapacitet.
- Kyl-COP är 3.

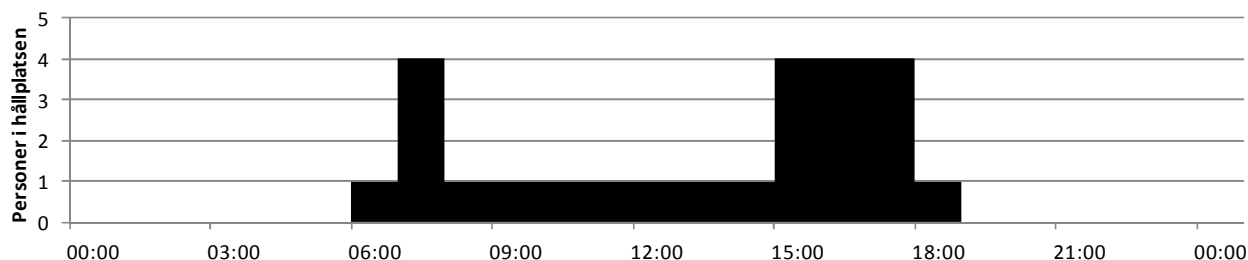
Chassi	0,22*T _{ute} -4,4 kW <u>Årssimulering</u> Sommar (17 °C): -0,7 kW Vinter (0 °C): -4,4 kW Vår/Höst (8 °C): -2,6 kW	
Motorvärme	3,2 kW	Samma året runt
AC-värme	Sommarfall 27,5 kW	

Personer i hållplats

Källa: Västtrafik, Chalmersfastigheter och egna observationer.

Enligt uppgift från Chalmersfastigheter går bussen vardagar 6:00-19:00 med tiominuterstrafik. Västtrafik bedömer att 300 personer per dag åker från hållplatsen och ingen åker till hållplatsen. Med antagande om att fler människor använder hållplatsen mellan 7:00-8:00 och 15:00-18:00, att bussen går var tionde

minut samt att det är lika stor chans att en person kommer precis innan bussen går som precis efter att bussen går blir antal personer i hållplatsen enligt figur nedan.



Med antagande om att alla personer använder ytterdörren för att komma in i hållplatsen blir antalet dörrpassager enligt figuren nedan.

