

TEORIHANDBOK - TAKVÄRME



LYNGSON

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	3
2	Typer av värmeöverföring.....	3
2.1.	Konduktion	4
2.2.	Konvektion.....	5
2.3	Värmestrålning	7
3	Teori om termisk komfort.....	10
3.1	Termisk komfort.....	10
3.2	Operativ temperatur.....	11
3.3	Klädsel och aktivitetsgrad	11
3.4	Drag	12
3.5	Andra faktorer som påverkar temperaturupplevelsen	13
3.6	Vistelsezon	14
3.7	Bestämning av termisk komfort.....	14
3.8	Riktlinjer för bestämning av inneklimat.....	15
3.9	Riktlinjer R1	15
3.10	Termiskt klimat	16
4	Takvärme	17
4.1	Operativ temperatur med takvärme	18
4.1	Temperaturgradient	19
4.1.1	Problem som orsakas av hög temperaturgradient.....	20
4.1.2	Mätningar av temperaturgradient vid fabriken i Olaine	20
4.2	Värmestrålning mot glas	22
4.3	Strålningsintensitet och energi för olika vinklar	24
4.4	Installationshöjd.....	26
4.5	Zonindelning	28
5	Klimat- och energisimuleringar för olika uppvärmningssätt	29
5.1	Inledning.....	29
5.2	Beskrivning av beräkningsmetod	29
5.3	Simulering för kontor	31
5.3	Simulering för skola	33
5.4	Simulering för hall.....	34
6	LCC analys, takvärmepaneler kontra fläktluftvärmare.....	35
6.1	Indata	35
6.2	Projektering & dimensionering	35
6.3	Förutsättningar	36
6.4	Analysen.....	37
6.5	Slutsats LCC-analys	39
6.6	Känslighetsanalys.....	40
6.6.1	Livscykeltid	40
6.6.2	Grundinvestering	41
7	Slutsatser / Fördelar med takvärme.....	42
8	Referenser	44

1 Inledning

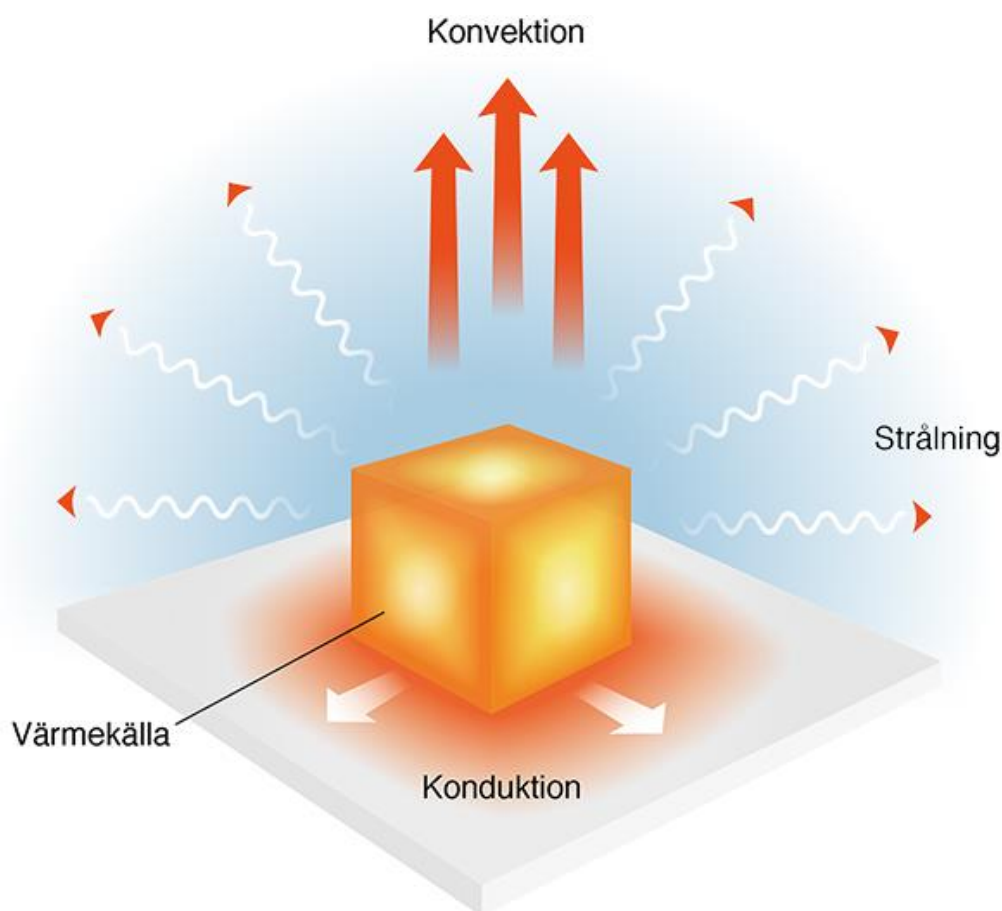
Syftet med detta dokument är att förmedla en djupare förståelse för hur uppvärmning med strålningsvärme fungerar, dess möjligheter och fördelar.

Inledningsvis behandlas teori gällande olika typer av värmeöverföring, termisk komfort och generell information om takvärme. Därefter beskrivs fördelarna med strålningsvärme samt fenomenet med temperaturgradienter i höga lokaler. De avslutande avsnitten handlar om utförda klimat- och energisimuleringar för olika värmekällor i olika typer av lokaler, samt hur man kan göra en LCC (Life Cycle Cost) -analys för en lokal med olika uppvärmningssätt.

2 Typer av värmeöverföring

Referens [1]

Värmeöverföring kan kort beskrivas som värmeenergi i rörelse på grund av temperaturskillnader. Energin flyttar sig alltid från varmare mot kallare och termodynamikens huvudsats om energins bevarande anger att den totala energin i ett slutet system alltid är konstant. Värmeenergi kan flyttas inom och mellan material på tre olika sätt: genom konduktion, konvektion och som värmestrålning. Ofta bidrar två, eller alla tre sätten till den totala värmeöverföringen.



Figur 2.1

2.1. Konduktion

Värmeenergi som sprider sig inom samma material eller mellan material i direkt kontakt med varandra kallas konduktion. Ett vanligt exempel är att en tesked som doppas i hett kaffe kommer att bli varmare också i den änden som är ovanför ytan. Värmens spridning i materialet kan förklaras med att temperatur och värme beror på atomernas och molekylernas rörelser. Ju mer energi partiklarna har desto mer ökar deras rörelser. När atomernas rörelse ökar vid uppvärmningen kommer de att kollidera med de närliggande atomerna och öka deras energi o.s.v. Energin leds på så sätt vidare i materialet tills systemet är i balans igen.

Matematiskt kan värmeledningen via konduktion beskrivas med ekvationen nedan. Eftersom energin flyttar sig från varmare mot kallare finns minustecknet för att visa flödesriktningen. Ekvationen är också känd som Fouriers lag.

$$q'' = -k \frac{dT}{dx}$$

Värmeflödet q'' [W/m²], är energins flödes hastighet och anger i vilken takt energin förflyttar sig i ett material. Värmekonduktiviteten k [W/(m·K)], är en materialkonstant som beskriver materialets värmeledningsförmåga. Värdet för k beror på materialet och varierar också med temperaturen. Värmeledningsförmågan kan ibland också betecknas λ . Några exempel för olika material finns i tabell nedan.

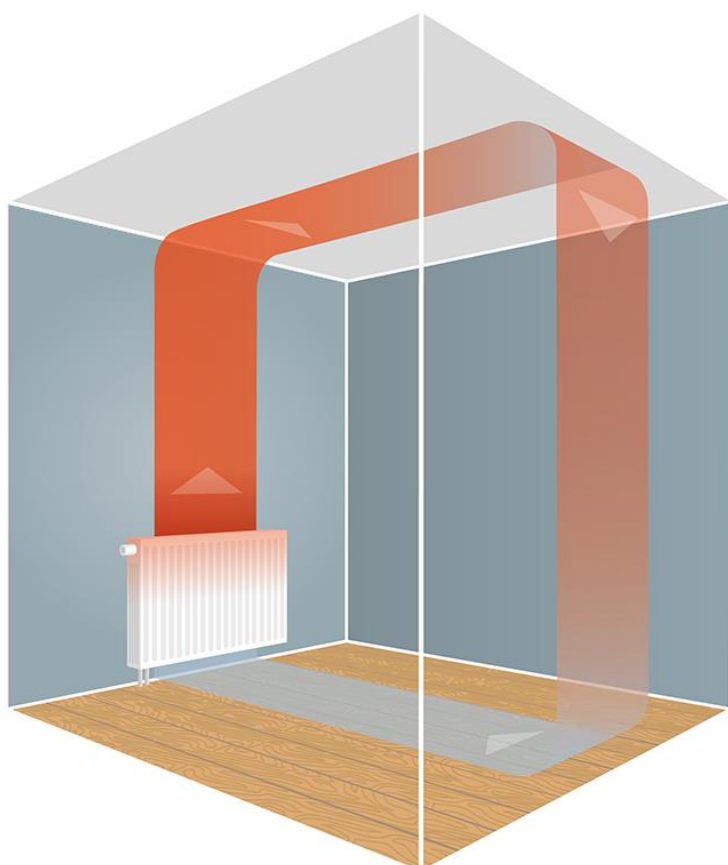
Material	k (W/mK)
Aluminium	237
Diamant	2300
Koppar	401
Rostfritt stål	15,1
Styrox (cellplast)	0,040
Polyuretan, hårt skum	0,026

Tabell 2.1: Värmekonduktiviteten k vid 300 K (27 °C) för några material

Material med hög värmeledningsförmåga används för att leda bort eller transportera värme som t.ex. kopparrör och aluminiumplåt i våra takvärmeprodukter eller konvektorer med aluminiumlameller. Om man istället vill hålla kvar värmen används material med så låg värmeledningsförmåga som möjligt, t.ex. vid isolering av husväggar. I material som leder värme bra minskar värmeledningsförmågan när temperaturen stiger. I ledande material är elektronerna tätare, och den ökade energin gör att elektronerna stöter på större motstånd i sina rörelser när de krockar med varandra. I isolerande material ökar k -värdet med stigande temperatur eftersom elektronerna är glesare och inte hindrar varandra när deras rörelseenergi ökar.

2.2. Konvektion

Värmeströmning, eller konvektion, sker när värme flyttar sig mellan en fast kropp och en strömmande gas (luft), t.ex. kylsystemet i en bilmotor. Energin på ytan av den fasta kroppen flyttar sig via diffusion till det lager av luft som är i direkt kontakt med ytan på samma sätt som vid konduktion. Den uppvärmda luften leds sedan bort med strömmen så luften i kontakt med ytan har konstant temperatur. Konvektion kan också ske åt andra hållet, alltså energi flyttas från luften till den fasta kroppen.



Figur 2.2. En radiator överför värme delvis via konvektion.

Värmeflödet q' [W/m²] genom konvektion kan beskrivas med ekvationen

$$q' = h(T_s - T_\infty)$$

där T_s är ytans temperatur, och T_∞ är luftens temperatur. Konvektionskoefficienten h [W/m² K] beror på gasen eller vätskan, och på dess flödes hastighet över ytan. Denna ekvation är också känd som *Newtons nedkylningslag*.

I verkligheten är detta med konvektion inte riktigt så enkelt. För att kunna beskriva värmeöverföringen mer detaljerat måste man också ta i beaktande att flödes hastigheten varierar genom hela flödet. Närmast den fasta kroppens yta är flödes hastigheten mycket långsam eller t.o.m. stillastående. Sedan ökar hastigheten genom hela flödet för att ha den högsta hastigheten vid flödets yta längst bort från den fasta kroppen. Ett exempel är luftstigning mellan paneler av en radiator eller en konvektor.

Om kroppen inte är helt slät kan det dessutom bildas turbulens i flödet. Det leder till att det ofta kan vara svårt att bestämma ett exakt värde för h . Men i de flesta fall fås en tillräckligt

bra approximation genom att använda vissa typiska värden för olika vätskor och gaser vid olika hastigheter.

Som kan ses i tabellen nedan transporterar vätskor värme bättre än gaser. Fri, eller naturlig konvektion är när vätskan eller gasen rör sig med ett naturligt flöde över ytan. Eftersom varm luft är lättare än kall kommer den varma luften att stiga uppåt och ge upphov till ett luftflöde över en yta.

Samma princip gäller också för vätskor. Fenomenet kan ses tydligt i till exempel en lavalampa där en vätska stiger och sjunker på grund av värmeskillnader. I en fläktkonvektor använder man sig av forcerad konvektion då man med hjälp av en fläkt tvingar luft genom ett värmebatteri.

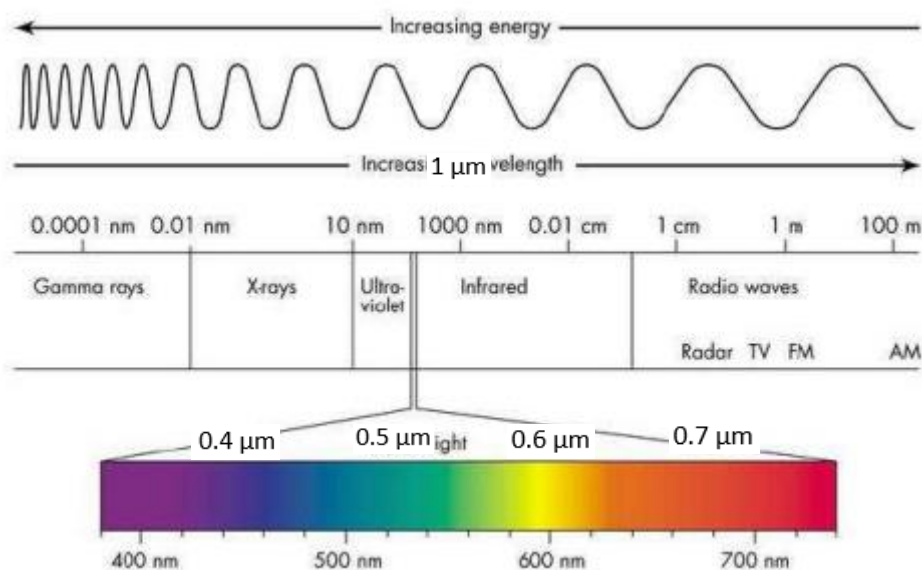
Process	h (W/m ² K)
Fri Konvektion	
Gaser	2-25
Vätskor	50-1000
Forcerad konvektion	
Gaser	25-250
Vätskor	100-20 000

Tabell 2.2: Ungefärliga värden för konvektionskonstanten h .

2.3 Värmestrålning

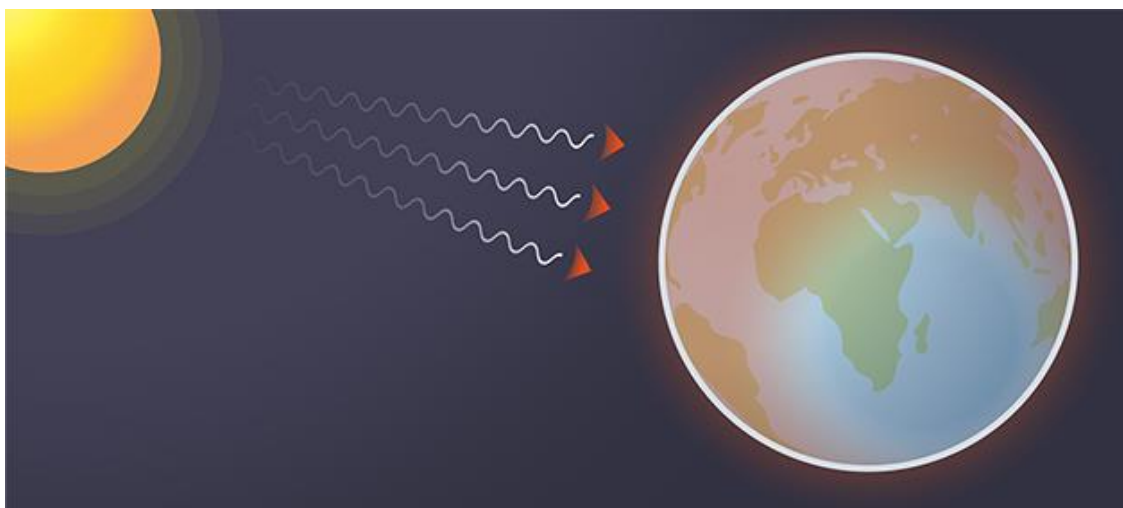
Det tredje sättet på vilket värme kan spridas är genom värmestrålning. Alla kroppar med en temperatur över absoluta nollpunkten sänder ut, eller emitterar, värmestrålning i form av elektromagnetiska vågor. Mekaniken bakom strålningen är elektronernas energinivåer. När ett ämne tillförs energi i form av värme exciteras elektronerna, d.v.s. de flyttar upp en energinivå i elektronmolnet och deras hastighet ökar. Då ökar också mängden värmestrålning som emitteras. I gaser och transparenta fasta material emitteras strålningen av alla atomer och molekyler i alla riktningar. I ogenomskinliga fasta ämnen däremot är värmestrålningen koncentrerad till ytan eftersom den strålning som sänds ut av de inre molekylerna absorberas av andra molekyler i närheten. Därmed är det endast strålningen från det yttersta lagret på ca $1\text{ }\mu\text{m}$ som sänds ut från ytan. Värmestrålningen från en viss punkt sänds ut åt alla håll i en halvsfär över ytan.

Värmestrålningen består av ett brett spann av våglängder av det elektromagnetiska spektret. Värmestrålningen består av hela det infraröda området, allt synligt ljus och dessutom en del av den ultravioletta strålningen. Våglängderna för värmestrålningen varierar alltså från $0,1\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$. Egentligen kan strålning av alla våglängder värma material, men de mycket korta respektive långa vågorna förekommer inte naturligt i omgivningen så de anses inte ha så stor betydelse för värmeöverföringen. Värmestrålningen från ytor av rumstemperatur består av infraröd strålning.



Figur 2.3: Den elektromagnetiska strålningens spektra. Värmestrålningen består av det infraröda området, det synliga ljuset och en del av den ultravioletta strålningen.

Ytor sänder ut olika mängd strålning för olika våglängder beroende på materialet och ytans temperatur. Vid de temperaturer som normalt finns i omgivningen består värmestrålningen av våglängder inom det infraröda området. Därför är värmestrålningen i vanliga fall osynlig. Men när temperaturen stiger blir våglängderna för den emitterade strålningen kortare och kortare ju högre temperaturen blir. På grund av detta ser en het metall ut att glöda eftersom strålningens våglängder kommer innanför området för synligt ljus. Eftersom solens temperatur är mycket hög består största delen av strålningen från solen av kortvågig strålning med våglängder kortare än $3\text{ }\mu\text{m}$.



Figur 2.4. Strålning behöver inget medie för att överföra sin energi. Den förlorar heller inte sin energi pga stort avstånd mellan varm och kall yta.

Som nämnts behöver konduktion och konvektion materia för att värme skall kunna överföras. Men värme i form av strålning behöver ingen materia utan kan spridas t.o.m. i vakuum. Det betyder att man kan isolera hur bra som helst för konduktion och konvektion och stoppa värmeförlusterna via dessa processer, men temperaturskillnaden kommer ändå att jämna ut sig till slut genom värmestrålning. Strålningens inverkan på den totala värmeöverföringen varierar även beroende på situation och material.

Värmeflödet q'' [W/m^2] i form av värmestrålning från en yta kan räknas ut med ekvationen:

$$q'' = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4)$$

där ϵ är ytans emissivitet och σ är Stefan-Boltzmanns konstant. T_s är ytans temperatur, och T_{sur} är omgivningens temperatur. Faktorn ϵ anger ytans emissivitet i förhållande till en så kallad svart kropp. En svart kropp är en teoretisk yta som sänder ut värmestrålning med maximal effekt. Ytan har emissiviteten $\epsilon = 1$, men en sådan yta finns inte i verkligheten. Ytan används för att jämföra verkliga ytors emissivitet i förhållande till den teoretiska svarta kroppen för att ha en referensyta att jämföra med. Eftersom ϵ anger andelen av den svarta kroppens emissivitet har ϵ alltid ett värde mellan 0 och 1 ($0 \leq \epsilon \leq 1$).

Emissiviteten är olika för olika material, och varierar också beroende på om ytan är blank eller matt. En metallyta som är lackerad med färg har t.ex. betydligt högre emissivitet än en blank metallyta. Några exempelvärden finns i tabell nedan. Några riktgivande faktorer för att uppskatta emissiviteten för olika material är att rena metaller allmänt har en låg emissivitet, men redan om ytan oxideras stiger emissiviteten märkbart. Vidare har elektriska ledare oftast låg emissivitet medan elektriskt isolerande material har en högre emissivitet. Oftast har isolerande material en emissivitet på över 0,6. För takvärmepaneler eftersträvar vi en hög emissivitet och därför ska panelens undersida alltid vara lackerad med färg.

Material	Emissivitet
Lackerad Aluminium transparent	0,10
Lackerad Aluminium med färg	0,75-0,90
Silver	0,05
Tyg	0,7-0,9
Hud	0,95

Tabell 2.3: Emissiviteter för några vanliga material

3 Teori om termisk komfort

Referens [4] och [6]

3.1 Termisk komfort

Begreppet komfort kan beskrivas som bekvämlighet. Att känna sig bekväm är en förutsättning för att prestera utan hinder. Begreppet "termisk komfort" kan då beskrivas som läget där människor är nöjda med temperaturen och varken vill ha ett varmare eller kallare klimat.

Människan har sitt ursprung i tropiskt klimat. Alltså är temperaturen, som hon tycker är behaglig, relativt hög i jämförelse med medeltemperaturen utomhus. Den termoneutrala zonen (Lundquist, 2015) ligger mellan 28°C och 31°C för en naken människa vid stillastående luft, medan medeltemperaturen för Stockholmsregionen ligger på ca 7°C. För att klimatet ska vara passande inomhus behöver husen utrustas med värme. Vid uppvärmning måste man ta hänsyn till vissa förutsättningar som krävs för människans överlevnad.

En viktig faktor är kroppstemperaturen som varierar beroende på bland annat ämnesomsättning, ålder, hormonella faktorer, fysisk aktivitet och även tid på dygnet. Den inre kroppstemperaturen ligger kring 37°C medan den yttre, hudtemperaturen, ligger på omkring 33°C. (SMHI, 2014)

Lufttemperatur över 30°C kan kännas obehaglig eftersom människor inte kan avge lika mycket värme och kroppstemperaturen stiger. För en lättklädd person kan temperaturen vid ca 20°C upplevas som kall. Detta beror på värmeregleringssystemet som kyler kroppen vid normala temperaturer eller sätter igång värmegenererande processer vid behov. En av dessa processer är det som benämns huttrande, som börjar när människans inre temperatur har nått 35,0°C.

Kroppen måste avkylas genom värmeöverföring i form av ledning, strålning och konvektion. Den måste producera lika mycket värme som den avger. Om mycket värme avges snabbt upplevs klimatet kallare, men om värmeavgivningen inte sker tillräcklig snabbt upplever vi klimatet varmare.

Varje människa är unik och den omgivande temperaturen upplevs därför olika beroende på många faktorer. Men några faktorer används som generalisering. Operativ temperatur, klädsel, aktivitetsgrad och drag behandlas nedan.

3.2 Operativ temperatur

Operativ temperatur beräknas för att kunna fastställa hur människor *upplever* temperaturen mer precist än bara luftens temperatur. Det som påverkar upplevelsen är:

- Lufttemperatur.
- Omgivande ytors temperatur.
- Avstånd till kalla eller varma ytor.

Den operativa temperaturen beräknas som medelvärde av luftens temperatur och omgivande ytors medelstrålningstemperatur, enligt formeln:

$$T_0 = (T_{\text{luft}} + T_{\text{medel, r}}) / 2$$

Där T_{luft} och $T_{\text{medel, r}}$ mäts upp på en specifik punkt i rummet. Medelstrålningstemperatur $T_{\text{medel, r}}$ definieras som den viktade medeltemperaturen hos omgivande ytor. Alltså vid samma lufttemperatur kan temperaturupplevelsen variera beroende på om exempelvis omgivande ytors temperatur är högre eller lägre eller om placeringen i rummet har ändrats.

3.3 Klädsel och aktivitetsgrad

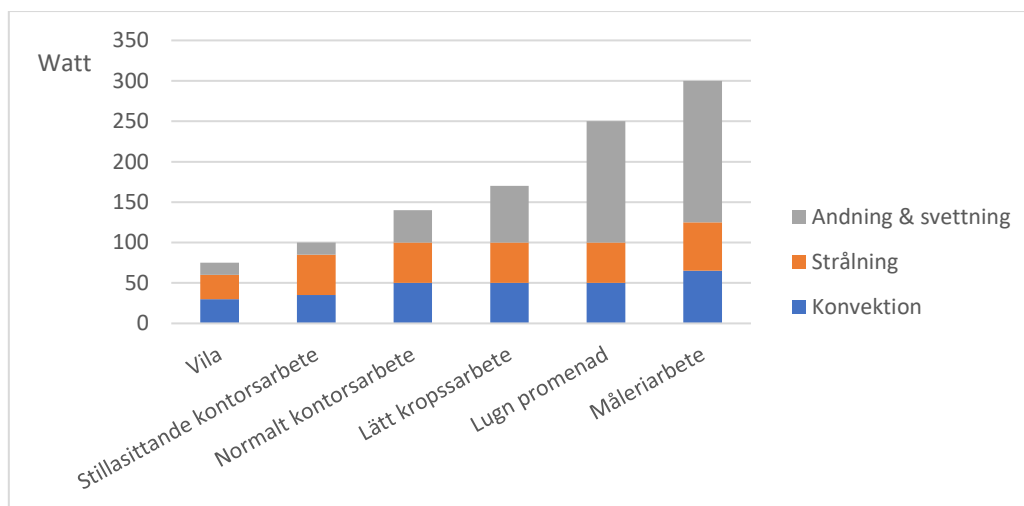
Klädsel och aktivitetsgrad är personberoende faktorer som till stor del varierar med verksamheten. Samtidigt är de beroende av psykosociala faktorer som är svåra att generalisera. Därför har branschen använt allmänna termer för att underlätta dimensioneringen av installationer.

Klädseln fungerar som isolering för att behålla kroppsvärmen och påverkar därför upplevelsen av det termiska klimatet. Clo-värdet är ett sätt att ange klädernas värmemotstånd. 1 clo är 0,155 K m²/W och motsvarar klädseln av en person som vid den operativa temperaturen 20°C, upplever termisk komfort. Några clo-värden visas nedan.

Typ av klädsel	clo-värde
Naken	0
Lätt sommarklädsel	0,5
Tunn sommarklädsel	0,7
Normal inomhusklädsel	1,0
Kraftig inomhusklädsel	1,5

Tabell 3.1: Några clo-värden. Källa: R1 – Riktlinjer för specifikation av inneklimatkrav (2013). VVS-föreningen.

Vid ansträngning förbränner kroppen energi och kroppstemperaturen kan då höjas. Utförs till exempel hård fysisk träning kan kroppens temperatur öka till 38-40°C. Det medför att vid hårt fysiskt arbete upplevs temperaturen högre än vid kontorsarbete, trots att lufttemperaturen är densamma. Som tidigare nämnts måste kroppen avge lika mycket värme som den producerar för att hålla kroppstemperaturen inom hälsosamma nivåer. Kroppen producerar värme i förhållande till aktivitetsgraden. Nedan visas värmeavgivning vid olika aktiviteter.



Figur 3.1: Diagram över värmeavgivning vid olika aktiviteter. Källa: Projektering av VVS-installationer (2010). Warfvinge & Dahlblom

Värmeavgivningen kan variera enormt beroende på sysselsättning. Ett sätt att standardisera värmeavgivning är att ange den i met, där 1 met motsvarar 60 W/m² hudyta. Detta är basmetabolismen hos en normal vilande vuxen människa. I tabell 3.1 visas olika met-värden för olika sysselsättningar där en "standardperson" har ca 1,8 m² hudyta.

Aktivitet	Värmealstring (W)	Värmealstring (met)
Sömn	85	0,8
Vila, sittande	100	1,0
Skrivbordsarbete	125	1,2
Sopa golvet	200	2,0
Gång nedför trappa	470	4,7
Löpning (8,5 km/tim)	740	7,4

Tabell 3.2: MET-värden för olika aktiviteter. Källa: R1 – Riktlinjer för specifikation av inneklimatkrav (2013). VVS-föreningen

3.4 Drag

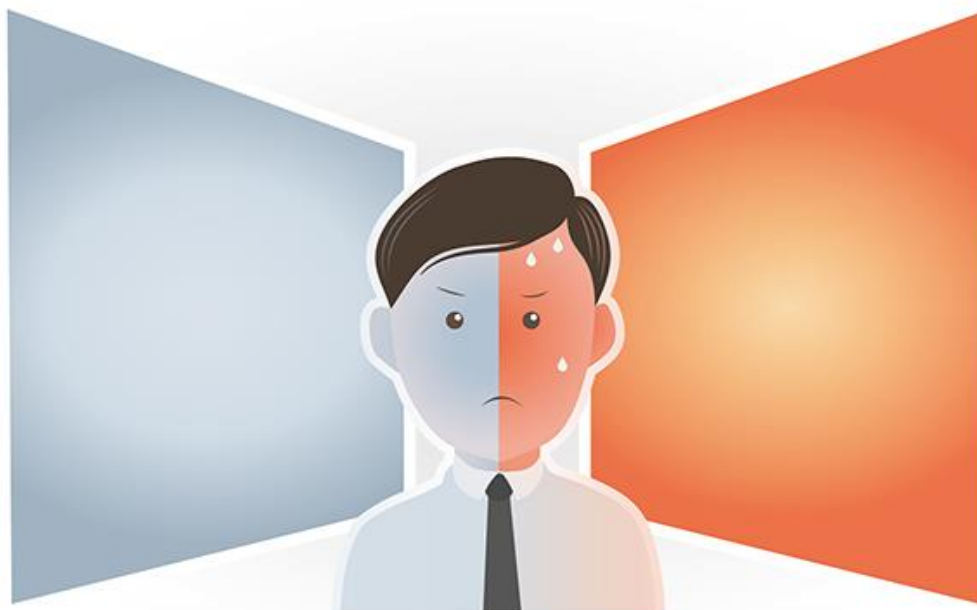
Drag är en *lokal* avkylning av hudens temperatur. Detta beror oftast på att luftens hastighet överstiger accepterade nivåer. Alltså att den är för snabb och genom konvektion kyer huden mer än önskat. Följden av detta är att det termiska klimatet upplevs obehagligt kallt. Detta sker vid ett visst förhållande mellan den operativa temperaturen och luftens hastighet. Vid lägre temperaturer kan små lufrörelser upplevas som obehagliga medan man vid högre temperaturer inte reagerar lika lätt på lufthastigheten. Drag kan t.ex. upplevas när lufthastigheten överstiger 0,15 m/s vid lufttemperatur mellan 20 och 24°C.

3.5 Andra faktorer som påverkar temperaturupplevelsen

Luftfuktighet påverkar klimatupplevelsen i mindre grad. Ändå har fuktigheten inverkan på oss. Människan svettas mer när fuktigheten är högre och på grund av detta kan klimatet upplevas varmare än vad det är.

Strålningsasymmetri är något som vanligtvis upplevs då man sitter bredvid en kall yta. Kroppen förlorar då mer strålningsvärme mot den kalla ytan än vad den gör mot övriga ytor. En känsla av drag förväxlas ofta med ett asymmetriskt strålningsutbyte med omgivningen. Strålningsasymmetri är alltså skillnad i värmestrålning på kroppens motsatta sidor.

Människan är i regel olika känslig beroende på om den kalla ytan är en vägg eller ett tak. En kall vägg eller ett kallt fönster skapar mer obehag än ett lika kallt tak. Detsamma gäller varma ytor, men då är förhållandet omvänt. Vi är mer toleranta mot en varm vägg än ett lika varmt tak.



Figur 3.2: Strålningsasymmetri

Golvtemperatur kan vara en avgörande faktor eftersom golvet är den ytan som kroppen är i kontakt med hela tiden. En kall yta absorberar och leder bort värme, vilket medför att klimatupplevelsen kan bli rubbad. Samtidigt är fötterna särskilt känsliga för minskad temperatur eftersom de är långt ifrån hjärtat. Olika golvmaterial kan upplevas olika vid samma temperatur; detta beror på att vissa material har en högre värmeledningsförmåga än andra. Därför kan det kännas bekvämare att trampa barfota på trägolv eller mattor än betong eller klinker vid samma förhållanden. Normalt uppstår inga problem om golvtemperaturen håller sig inom 20-24 °C.

Vertikal temperaturgradient, med temperaturskillnader i luften mellan golv och tak uppstår en vertikal temperaturgradient. En stor temperaturskillnad i höjdlängd kan orsaka obehag hos stillasittande personer. Om skillnaden i lufttemperatur vid huvud och fötter är större än 3°C kan det upplevas som obehagligt. Detta kan uppstå av exempelvis låg tillufttemperatur i kombination med stora värmekällor i rummet, vilket då kan resultera i att termisk komfort inte kan nås.

3.6 Vistelsezon

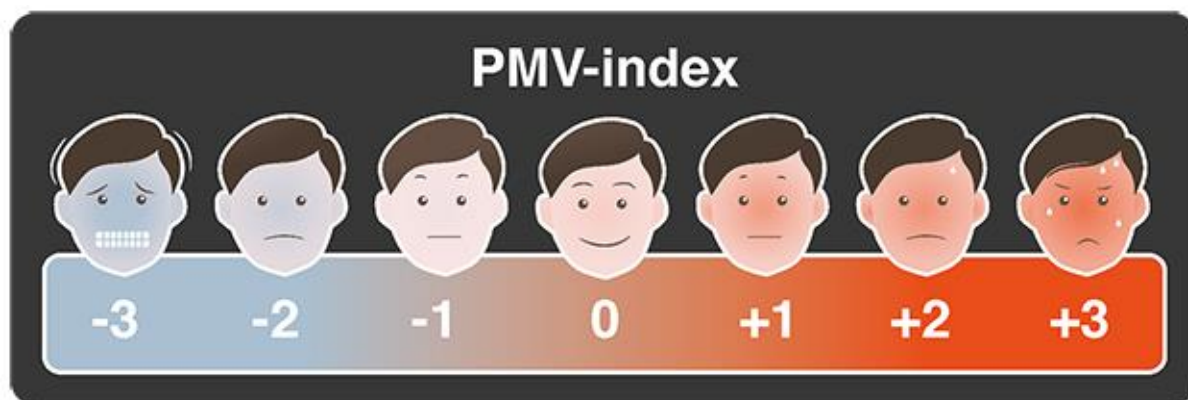
Vistelsezonen är ett begränsat område där de bestämda kraven på inneklimatet ska uppfyllas. Denna zon definierades av BBR (Boverkets Byggregler) med avsikt att underlätta skapandet av det önskade klimatet genom att bortse från den del av rummet som är känsligare för variationer. Dessa zoner kan utesluta fönster, dörrar och andra ytor som påverkar den operativa temperaturen via strålning.

3.7 Bestämning av termisk komfort

Som tidigare nämnts är termisk komfort beroende av många faktorer. Svårigheten att uppnå termisk komfort ökar när den mänskliga faktorn också spelar in. Att bestämma vad termisk komfort innebär är en svår uppgift, men det finns några vedertagna modeller som beskrivs nedan.

PMV och PPD

PMV (-index) står för **Predicted Mean Vote** och anger en bedömning på hur det termiska klimatet föreligger. Hos en grupp människor beräknas den förväntade upplevelsen av klimatet på en skala med sju steg, från -3 till +3.

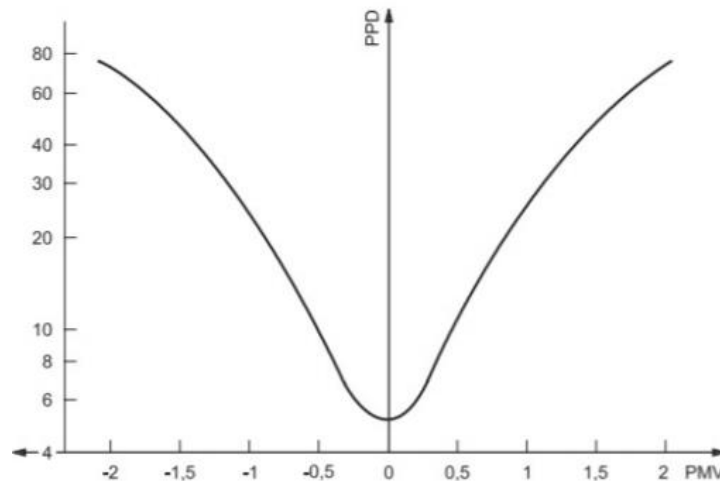


Figur 3.3: PMV-index. 0=bra, >0 är för varmt, <0 är för kallt.

PPD (-index) står för **Predicted Percentage Dissatisfied** och anger den förväntade andelen personer som är missnöjda med det termiska klimatet. För att få ett korrekt index antas att alla har samma förutsättningar, alltså samma klädesplagg, metabolism samt aktivitet.

PMV- och PPD-index beräknas genom komplicerade ekvationer med ett antal variabler. Några av dessa variabler är aktivitetsgrad (met), klädseln (clo), lufthastighet, lufttemperatur och värmestrålning som har beskrivits tidigare.

För att kunna definiera termiska klimatklasser används PPD-index (andelen missnöjda). Den beräknas som funktion av PMV-index eller läses av i följande diagram i figur 3.4. Där visas sambandet mellan begreppen PMV- och PPD-index. Diagrammet visar att det är omöjligt att få ett "perfekt" klimat, där 100% av alla personer är nöjda med samma förutsättningar.



Figur 3.4: Samband mellan PPD och PMV. Källa: ISO 7730:2006

PPD och PMV utvecklades av Povl Ole Fanger, en dansk inneklimatforskare. Han har även utvecklat andra metoder för bestämning av inneklimat.

Fangers komfortekvation

Beräkning av termisk komfort kan se ut på olika sätt. Fanger utvecklade flera sätt att hitta en optimal temperatur för människors trivsel. Ekvationen är invecklad och det är svårt att förstå alla beteckningar. Förenklingar i form av diagram har sammanställts för en enklare bestämning av inneklimatet. Dessa använder några av variablerna som tidigare behandlats: klädsel, lufthastighet, -fuktighet, -temperatur, omgivande ytors temperatur samt aktivitet.

3.8 Riktlinjer för bestämning av inneklimat

I och med att det har blivit allt viktigare att få en hög standard på byggnader idag har fler och fler krav använts och tillämpats. För att bedöma kvaliteten på inneklimaten har det tagits fram riktlinjer som hjälpmedel.

Syftet med dessa riktlinjer är att de ska, utifrån svensk standard och myndighetskrav, användas som referenser vid projektering, upphandling och vid bestämning av inneklimatkvaliteter.

Riktlinjerna som oftast används av företagen vid projektering är, R1 - Riktlinjer för specifikation av inneklimatkrav. Detta beror på att dessa har varit till hjälp under många år och de har uppdaterats för att hålla dem aktuella. Det finns andra alternativa riktlinjer som börjar användas men inte i samma utsträckning som R1:an.

3.9 Riktlinjer R1

R1 - Riktlinjer för specifikation av inneklimatkrav, kom ut 1990 i form av rekommendationer för inneklimatprojektering. Sedan dess har den reviderats för att hållas aktuell. År 2000, 2006 och 2013 har nya och reviderade versioner släppts ut. Beskrivning av följande inneklimatfaktorer är baserade på Lars Ekbergs R1 - Riktlinjer för specifikation av inneklimatkrav (2013).

3.10 Termiskt klimat

TQ 1, 2 är termiska klimatklasser som beskriver de termiska klimatkrav som råder vid respektive klass. Här är standarden SS-EN ISO 7730 styrande och ger oss kraven/riktlinjerna för det termiska inomhusklimatet mer ingående.

Det termiska klimatet är baserat på hur stor andel av en ansenlig grupp människor som kan väntas, utifrån klädsel och aktivitet, vara nöjda över ett bestämt termiskt klimat. Detta är kopplat till direkta motsatsen PPD, Predicted Percentage Dissatisfied, där man räknar på hur många människor i en grupp som är missnöjda över ett givet termiskt klimat.

När det gäller det termiska klimatet är det omöjligt att få "perfekta" förhållanden. Det kommer alltid att vara minst en person som upplever klimatet som obehagligt, oavsett om de termiska omständigheterna är optimala. Enskild reglering av klimatet bedöms vara värdefullt då klimatet kan anpassas efter eget tycke.

Detta leder till klimatklassen TQ1 för kontor, där just den individuella individen ska kunna reglera rumstemperaturen i till exempel enskilda rum.

Här nedan visas en tabell med målvärden för det termiska klimatet och för de olika klasserna.

Målvärde	TQ1	TQ2
Golvtemperatur (°C)	22-26	20-26
Rum ej avsedda för barns vistelse		16-27
Vertikal temperaturgradient 0,1-1,1 meter över golv (K/m)	<2	<3
Strålningstemperaturasymmetri		
Varmt tak	<5	<5
Kall vägg	<10	<10
Dragrisk		
Dragindex	10%	20%
Lufthastighet (m/s)	Vid $t_{\text{lufft}}=20^{\circ}\text{C}$, <0,1m/s Vid $t_{\text{lufft}}=26^{\circ}\text{C}$, <0,15m/s	Vid $t_{\text{lufft}}=20^{\circ}\text{C}$, <0,15m/s Vid $t_{\text{lufft}}=26^{\circ}\text{C}$, <0,25m/s

Tabell 3.3: Målvärden för det termiska klimatet. [6]

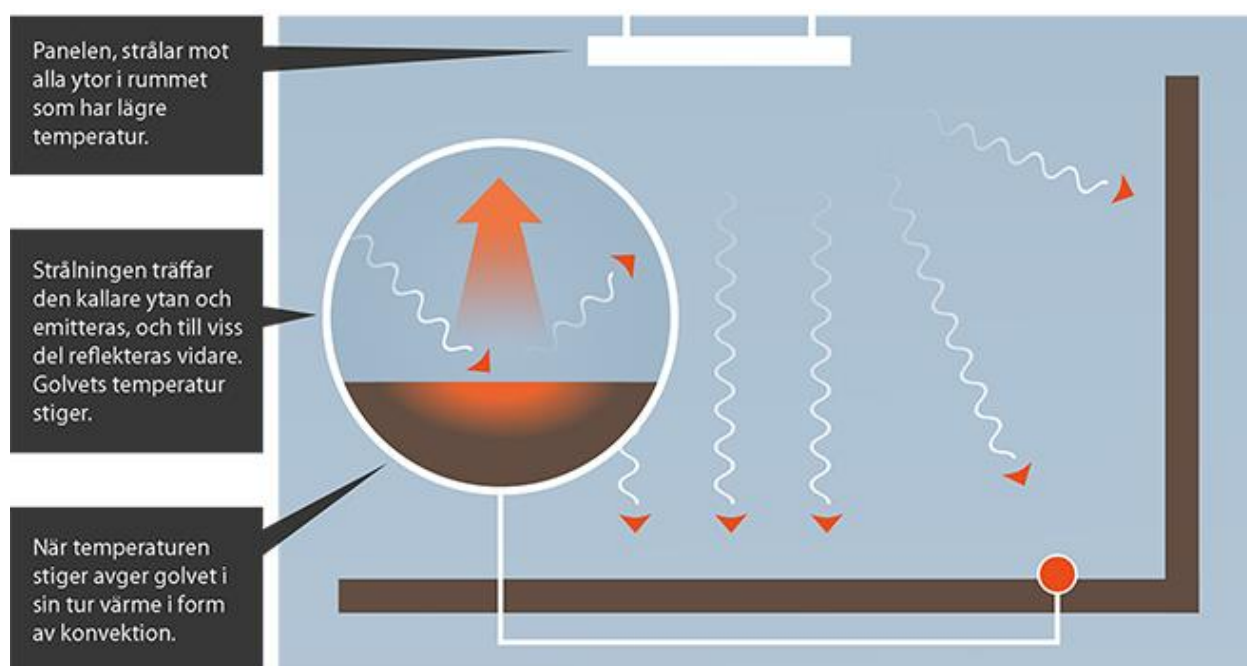
I dag anses att PPD-indexet får uppgå till maximalt 10 % för de båda klimatklasserna. Med andra ord, att inneklimatet "normalt anses som komfortabelt".

4 Takvärme

Värmeavgivningen från takvärmepaneler består av en hög andel strålning och låg andel konvektion. Strålningen är s.k. lågtemperaturstrålning vilket gör att den inte upplevs lika intensivt som den från solen eller en elektrisk infravärmare.

Värmestrålningen sprider sig på ungefär samma sätt som ljus. Den värmer alla ytor den träffar vilka i sin tur värmer omgivande ytor. På så sätt kommer även ytor som skuggas, t.ex. under ett skrivbord, att värmas upp. Skillnader i temperatur i rummet och på olika ytor strävar efter att jämnas ut, vilket gör att rummet får en mycket jämn temperaturfördelning mellan tak och golv.

De ytor dit strålningsvärmen överförs kommer att värmas till en temperatur som är högre än de skulle haft vid konventionell uppvärmning. När omgivande ytor är varmare förlorar människokroppen mindre värme till omgivningen, vilket påverkar vår upplevelse av det termiska klimatet.



Figur 4.1: Spridning av värmestrålning

Takvärme kan i stort sett användas i alla typer av byggnader. Mest använd är takvärmepaneler i lokaler med höga takhöjder, då det ger lägre energikostnad och högre komfort jämfört med andra uppvärmningsmetoder. I många fall är takvärmepaneler även den enda praktiskt möjliga uppvärmningsmetoden i lokaler med hög takhöjd. Vanliga användningsområden är t.ex. idrottshallar, verkstäder, lager, industrierhallar, bilsalonger och köpcentra.

Takvärmepaneler används även med fördel i kontor, daghem, förskolor, vårdlokaler, skolor och andra offentliga inrättningar.

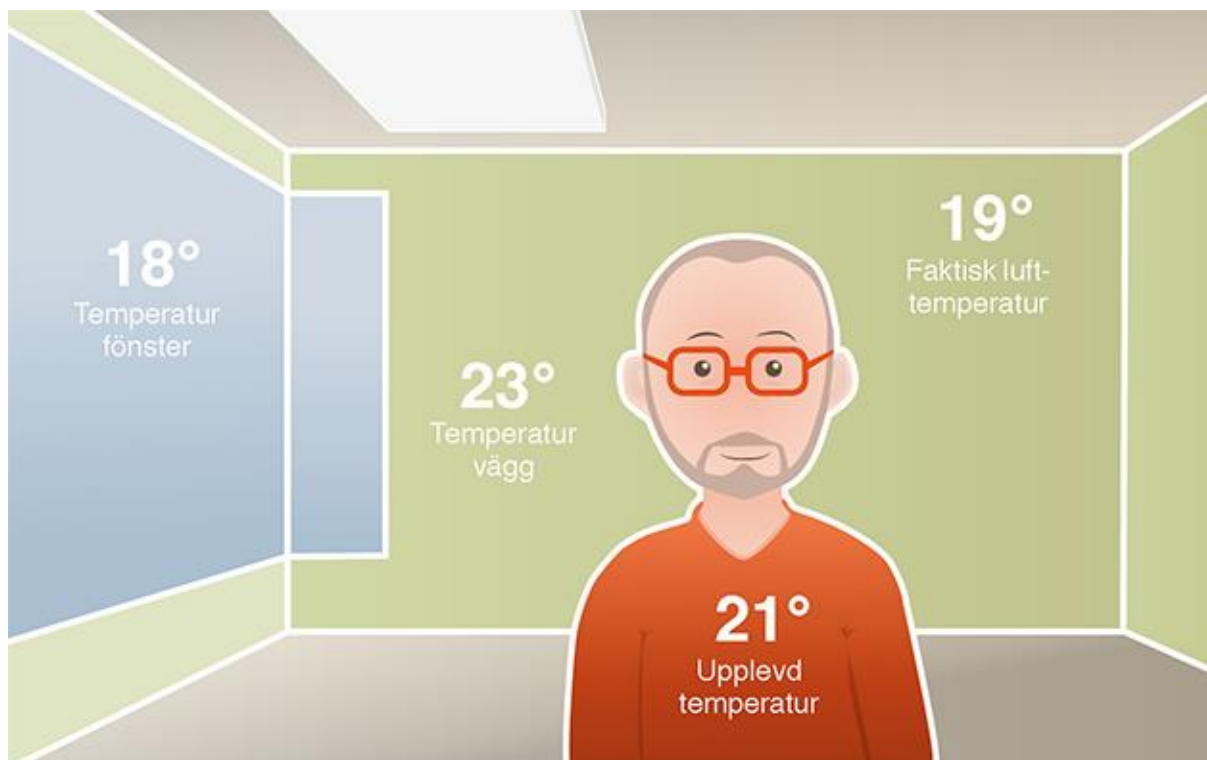
Takvärmepaneler fungerar också utmärkt i lokaler där endast en del av lokalen ska värmas, s.k. zonindelad uppvärmning. Det kan t.ex. vara i lokaler där verksamheten kräver en låg temperatur. Genom att med strålningsvärme höja omgivande ytors temperaturer, kan man inom en begränsad del av lokalen höja den upplevda temperaturen. Resultatet blir en behagligare arbetsmiljö.

4.1 Operativ temperatur med takvärme

Som tidigare nämnts så definieras operativ temperatur som medelvärdet av luftens temperatur och omgivande ytors medelstrålningstemperatur. I många fall, med konventionell uppvärmning, är den operativa temperaturen lägre än lufttemperaturen pga svala omgivande ytor. Att höja lufttemperaturen för att uppnå termisk komfort är dyrt, för varje grad temperaturen höjs så ökar energikostnaden med ca 5%.

Med ett rätt projekterat system för takvärmepaneler kommer den operativa temperaturen att bli högre än lufttemperaturen. Vi upplever alltså att det är varmare än vad termometern visar. Till viss del beror det på att vi får en större andel direkt värmestrålning från panelerna men till stor del att samtliga omgivande ytor får en högre temperatur vid uppvärmning med takvärmepaneler. Vi kommer då förlora mindre andel värme till omgivande ytor i form av strålning.

Genom att höja omgivande ytors temperatur kan man alltså sänka lufttemperaturen och fortfarande behålla den operativa temperaturen. Det ger en direkt kostnadsbesparing som inte påverkar den termiska komforten.



Figur 4.2: Möjlighet till högre operativ temperatur, än lufttemperatur, med takvärme.

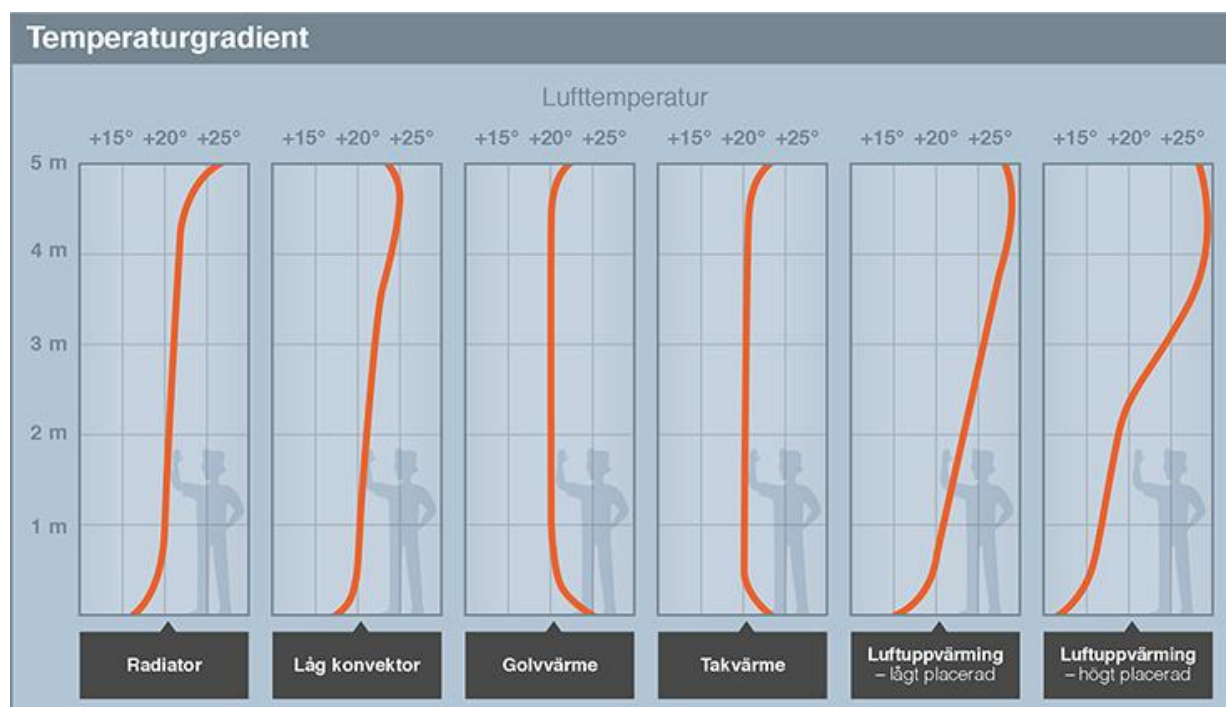
4.1 Temperaturgradient

Varmare luft tenderar att stiga upp och kallare luft att sjunka på grund av deras variation i densitet. Den vertikala temperaturgradienten i en byggnad är ett mått på hur mycket lufttemperaturen ökar per meter. I en inomhusmiljö utan aktiv luftflödescirkulation, stratifierar (skiktas) olika lager av luft vertikalt. Varmluft med lägre densitet stannar över kall luft med högre densitet. Stratifieringen av temperatur och densitet förblir vanligtvis stabil i byggnaden om det inte finns ventilation.

Stora höga byggnader som lager, köpcenter och hallar har en högre temperaturskillnad mellan golv och tak. Ju högre taket är desto större blir temperaturskillnaden.

Lufttemperaturen på taknivå i en 8 m hög hall blir betydligt högre än i ett rum med normal takhöjd (ca 3 m) förutsatt att båda byggnaderna har samma vertikala temperaturgradient och samma temperatur vid temperaturgivaren, som reglerar värmesystemet. Om temperaturgradienten t.ex. är $1\text{ }^{\circ}\text{C/m}$ är lufttemperaturen vid takhöjd i den höga hallen mer än $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ högre än i rummet med normal takhöjd.

Temperaturgradient är naturligtvis beroende av uppvärmningssätt som används i byggnaden. I tekniska meddelande nr 65 (Peterson, 1975) [2] finns en kort sammanställning över temperaturgradienten vid olika uppvärmningssystem.



Figur 4.3: Vertikal temperaturgradient vid olika uppvärmningskällor

4.1.1 Problem som orsakas av hög temperaturgradient

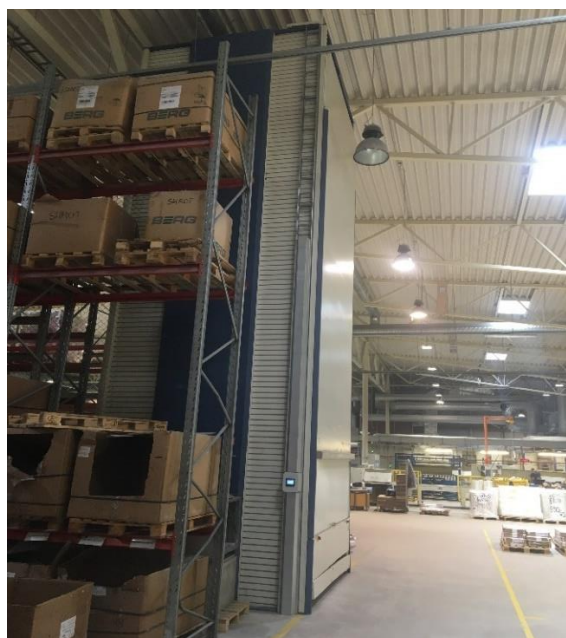
Som nämnts tidigare kommer varm luft att ackumuleras i den övre delen av ett rum om byggnadens värmesystem är inställt för att upprätthålla en acceptabel temperatur vid nivån för temperaturgivaren. En av de kritiska faktorerna vid bestämning av värmeöverföring genom en byggnads klimatskärm, dvs väggar, tak mm, är temperaturskillnaden mellan inomhus och utomhusluft. Den stora temperaturskillnaden som orsakas av en hög temperaturgradient leder till högt värmeflöde genom väggar och tak. För en lagerlokal betyder det oftast att takytan utgör en högre andel av klimatskärmen jämfört med bostadshus. Detta innebär att en relativt större del av värmeenergin går förlorad genom tak i lagerbyggnader än i bostadshus.

Hög temperaturgradient medför också problem med hänsyn till byggnadens komfort. Den ojämna temperaturfördelningen vid olika luftlager kan medföra att det är för kallt för en person vid golvnivå och för varmt för en person som är placerad i en högre position i byggnaden. I lokaler med hög temperaturgradient har man också ofta ett långsammare svar i termostaternas temperaturreglering, eftersom hetluft från värmaren tenderar att stiga och ackumuleras på högre nivåer.

Kondensering är ett annat problem som kan orsakas av hög temperaturgradient, eftersom den nedre delen av luften är kallare och därför har en lägre daggpunkt. Simhall är ett typiskt exempel av byggnad som lider av kondens.

4.1.2 Mätningar av temperaturgradient vid Epecons fabrik i Olaine

Våren 2018 installerades utrustning för mätning av temperaturgradient vid Lyngson/Epecons fabrik i Olaine utanför Riga. Utrustning placerades i en äldre hall som värms av pulverlackeringsugnen och radiatorer, framförallt konvektionsvärme, samt i en nybyggd hall som värms med takvärmepaneler, framförallt strålningsvärme. Temperaturgivare är placerade på varje meter från golv upp till tak (8 m).



Figur 4.4: Äldre hallen. Resultatet visar att temperaturgradienten är 4,5°C dvs 0,64°C/m



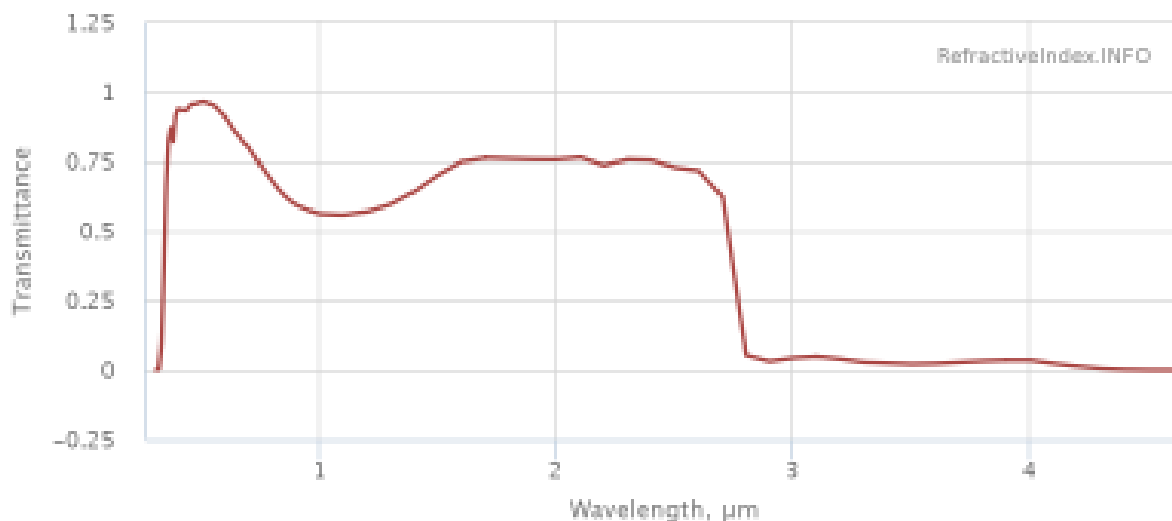
Figur 4.5: Nya hallen. Resultatet visar att temperaturgradient med takvärme är 1,9°C dvs 0,27°C/m

Resultaten från mätningar på fabriken stämmer ganska bra med simuleringsresultat som är redovisade i sista kapitlet av detta dokument.

4.2 Värmestrålning mot glas

Bilden nedan visar vilka våglängder av elektromagnetisk strålning som kan transporteras genom glas.

Det är bara strålning med våglängder upp till ca 2,7 μm som kan transporteras genom glas. Våglängdsområdet för solstrålning är ungefär 0,3-4 μm . Del av solstrålningens våglängder passerar därmed genom glas och vi förstår varför solstrålning värmer upp rummet innanför glasrutan. Takvärmepaneler avger strålning i våglängder mellan 8-15 μm , vilket innebär att värmen istället kommer att absorberas i glaset, som i sin tur värms upp och på så vis reducerar kallraset.



Figur 4.6: Transmittans genom glas i förhållande till våglängd för elektromagnetisk strålning. Grafen visar hur stor andel av strålningen som glaset släpper igenom (1 = 100%).

Kallras uppstår när en yta, ofta fönster, kyler ner rumsluften. Luften som är närmast ytan blir då tyngre och faller nedåt. Ju kallare ytan är desto snabbare faller luften och det kommer upplevas som drag. Faktorer som avgör om kallras kommer att uppstå, och upplevas som störande, är bl.a. konstruktionens U-värde, (värmegenomgångskoefficient), rumstemperatur och ytans höjd. Vid ett högt glasparti accelererar kalla luften om den inte hindras av en värmekälla, och kommer snabbt upp i 0,1 m/s som är gränsen för TQ1 i sommarfallet.

Det traditionella sättet att motverka kallras är att placera en värmekälla under, eller framför, fönstret som skapar en varm uppåtgående luftström. Den lösningen hindrar oftast inte att kallras uppstår men kan motverka att man i vistelsezonen upplever drag. Vid höga glaspartier behöver man ofta komplettera med värmekällor i flera nivåer då varma luftens stigkraft avtar då den svalnar.

Genom att använda takvärmepaneler som skydd mot kallras hindrar man istället att kallrasen uppstår. Då värmestrålningen till största delen absorberas av glaset kommer ytan att värmas och risken för kallras reduceras. Klimatet strävar alltid efter jämvikt och strålningen från en takvärmepanel kommer därför att dras mot de ytor som är kallast, oavsett material. Hur mycket ytan värms upp beror på strålningens infallsvinkel och materialets emissivitet.

Det här gör att takvärmepaneler med fördel kan användas för att förhindra kallras och fungerar både i kombination med en konvektor eller som ensam värmekälla.

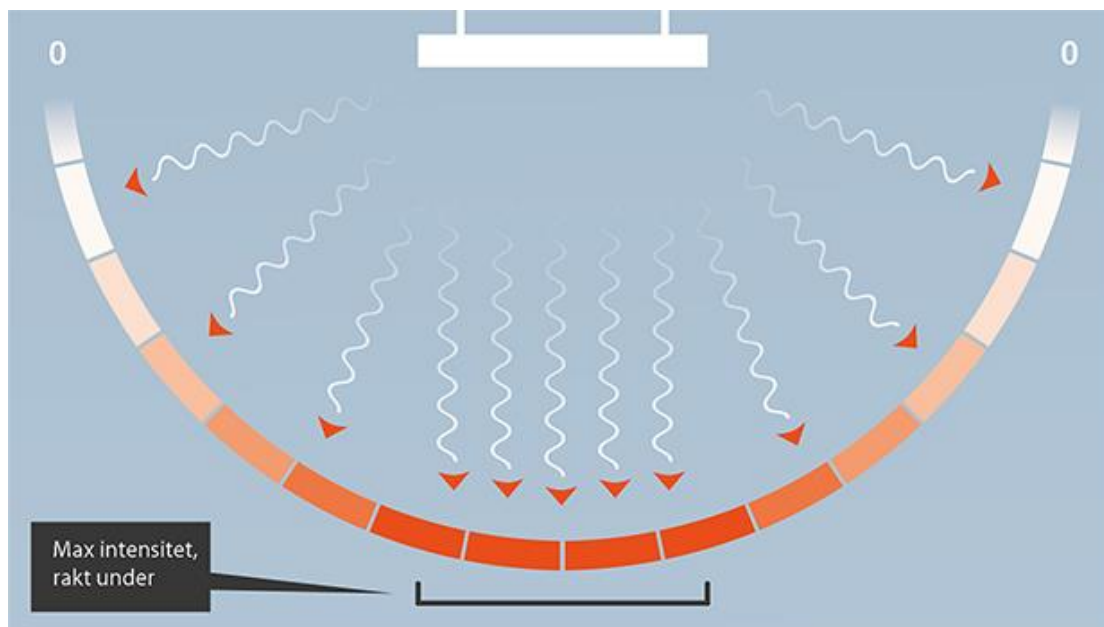


Figur 4.7: Kallras vid fönster och hur det kan motverkas.

4.3 Strålningsintensitet och energi för olika vinklar

Strålningsintensiteten för olika vinklar från en yta beskrivs av Lamberts cosinuslag.

Strålningens intensitet från en matt yta är som störst vinkelrät mot ytan och avtar proportionellt med cosinus för strålningens infallsvinkel. Om vinkelrätt mot ytan är 0° så är sambandet $\cos(0)=1$ och dess ytterlighet $\cos(90)=0$, se figur nedan.



Figur 4.8: Strålningsintensitet från en takvärmepanel

Strålningen från takvärmepanelen sprids i alla riktningar från den varma ytan, men strålningen med högsta intensiteten vinkelrät mot ytan. Det innebär att om panelen är placerat horisontellt i taknivå så uppnås högst strålningsintensitet på ytan direkt under panelen.

För att undvika övervärmningskänsla bör intensiteten på huvudnivå inte överstiga 200 W/m² golvyta [3]. Detta värde kan teoretiskt beräknas med följande ekvation:

$$I_s = \text{Strålningsintensitet (W/m}^2\text{)} \quad I_s = \frac{\Phi \times \eta_s}{A} \leq 200$$

Φ = Installerad effekt (W)

A = Golvarea (m²)

η_s = Strålningsandel (%)

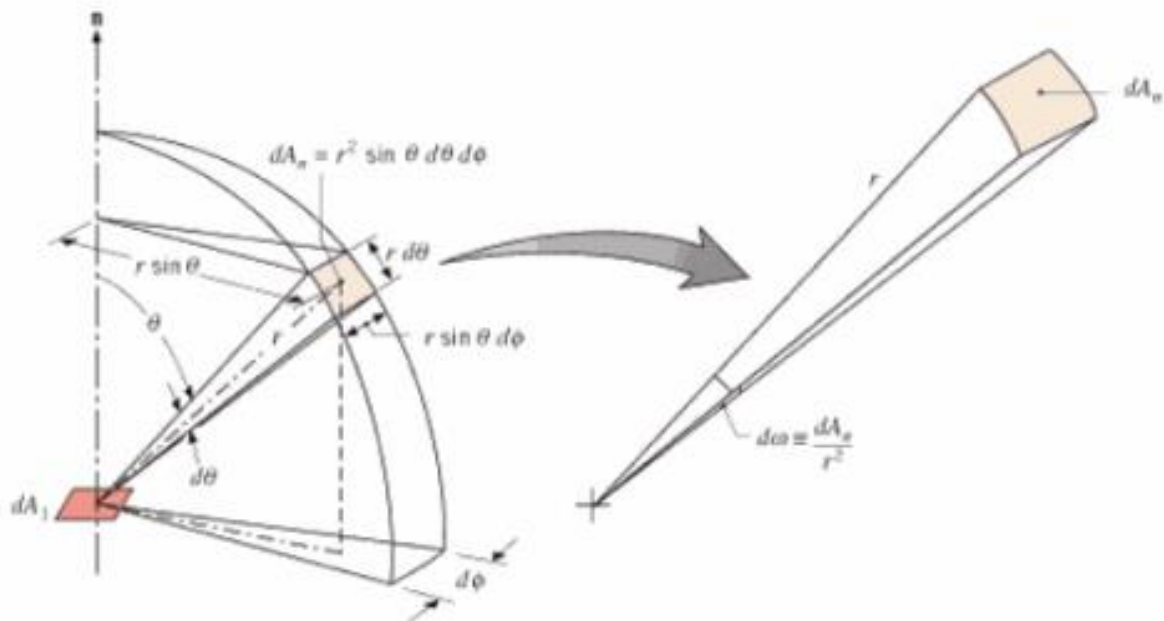
Strålningsandelen är beroende av panelens medeltemperatur i förhållande till rumstemperatur, $(\Theta_{w1} + \Theta_{w2})/2 - \Theta_i$, samt panelens bredd. I [3] finns en graf över detta men i praktiken kan man räkna med att man väldigt sällan överstiger 75% för paneler som har en tillloppstemperatur under 100°C. Som tumregel brukar man säga att strålningsandelen ligger runt 60% för anläggningar som arbetar med dagens systemtemperaturer för fjärrvärme eller värmepump, avvikelser förekommer.

Θ_{w1} = Tillloppstemperatur

Θ_{w2} = Returtemperatur

Θ_i = Rumstemperatur = 20°C

När man räknar ut den totala energin en yta sänder ut med ekvationen ovan får man som resultat den mängd strålning ytan sänder ut i alla riktningar. Om man vill veta vilken mängd strålning från ytan som kommer att träffa en annan yta måste man räkna ut hur stor del av strålningen som är på väg i just den riktningen. Man räknar då med ett sfäriskt koordinatsystem för att ta reda på arean mellan de vinklar man är intresserad av. Den del av strålningen som träffar arean mellan dessa vinklar kallas strålningens intensitet, och betecknas I . Intensiteten har också betydelse när man vill veta från vilken vinkel strålningen kommer, eftersom strålningens infallsvinkel inverkar på hur strålningen kommer att påverka ytan som träffas.



Figur 4.9

Bara en del av den totala energin E som sänds ut från en yta kommer att träffa en annan yta mellan de sfäriska vinklarna θ och ϕ . Energin kan räknas ut med ekvationen nedan:

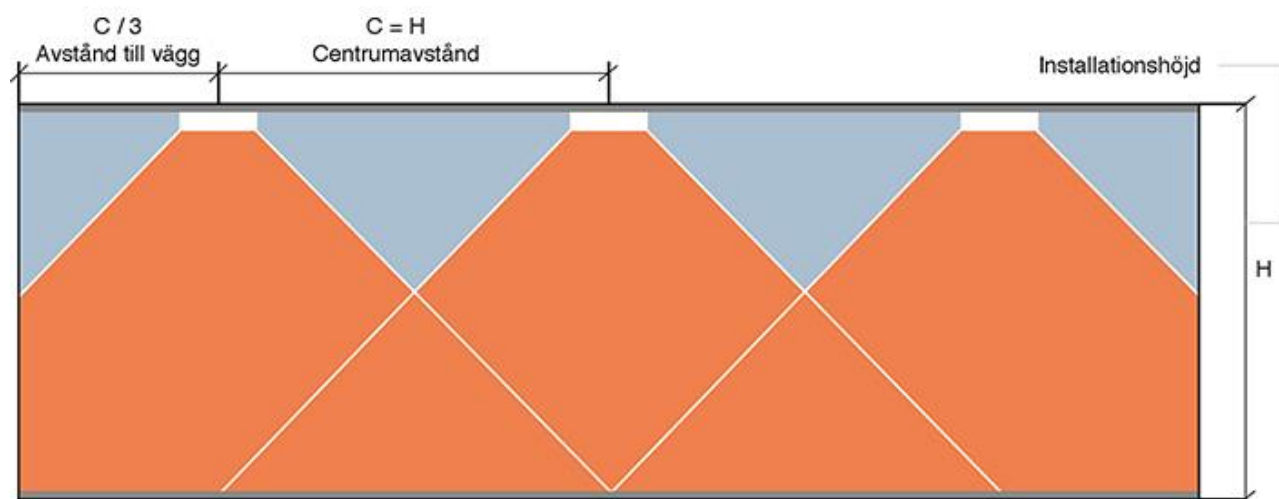
$$E = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} I \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi$$

4.4 Installationshöjd

Eftersom strålningen omvandlas till värme först då den träffar en yta så tappar den heller inte någon effekt då den monteras högt upp under förutsättning att luften är ren. Ofta blir takvärmepanelernas placering beroende av övriga installationer och man ska undvika att "skugga" panelerna med stora ventilationskanaler eller ljudabsorbenter.

För normalt isolerade hallar så uppstår sällan för hög strålningsintensitet och för byggnader som uppfyller BBR-kraven (krav i Sverige) så är för hög strålningsintensitet inte ett problem.

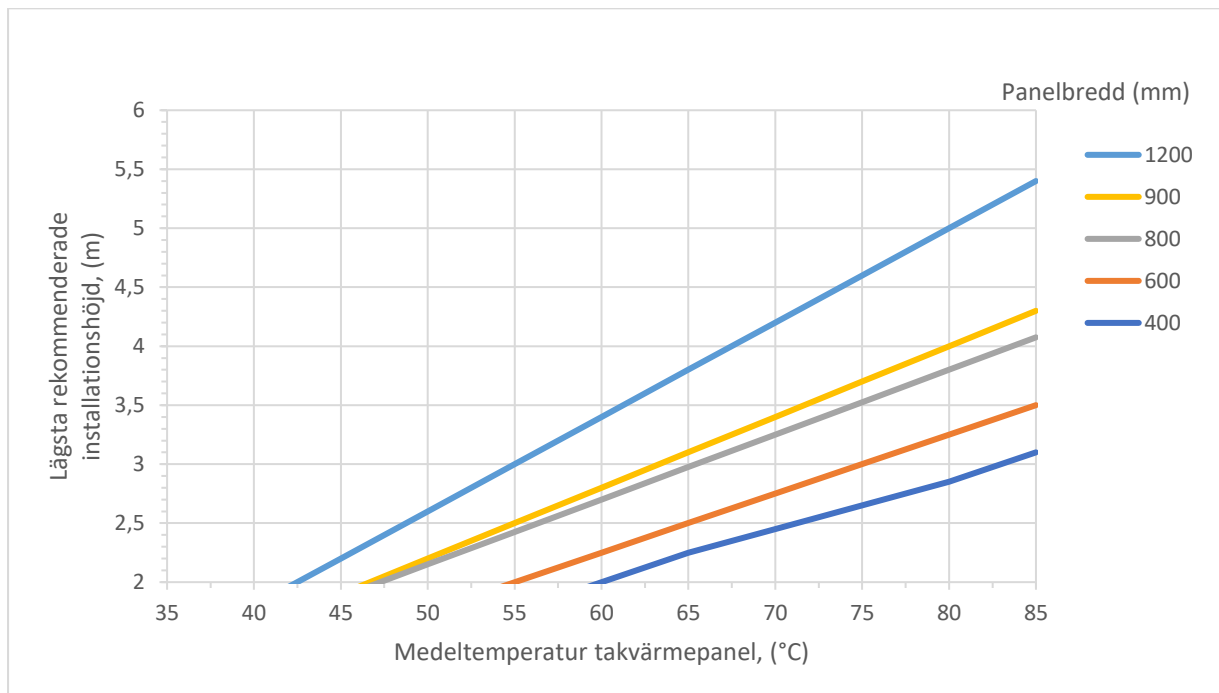
För att i de flesta fall erhålla tillräcklig täckning av golvytan kan man som en enkel tumregel utgå från att centrumavståndet, C-måttet, mellan ingående panelstråk är detsamma som monteringshöjden, H. Som exempel innebär detta att om panelerna placeras på 5 meters höjd bör C-måttet mellan stråken också vara ca 5 meter. Det ytterst placerade panelstråket bör monteras på ett avstånd från vägg till centrum på panel som motsvarar ca 1/3 av monteringshöjden. Då kommer strålningsvärmens att avges optimalt mot väggytan och effektivt reducera eventuellt kallras.



Figur 4.10. Önskad placering av takvärmepaneler för bästa täckningsgrad av vistelsezonen.

Vid större monteringshöjder än 8-10 meter kan en förtätning mellan stråken behövas för att önskad effekt vid golvnivå ska uppnås. Detta gäller i första hand lokaler med smutsig luft, till exempel i en svetsverkstad där partiklar i luften delvis kan hindra strålningens väg ned mot golvet.

För att undvika en för hög strålningsasymmetri bör man inte installera takvärmepanelerna lägre än vad figur 4.11 nedan anger. Avsteg från detta kan förekomma om flera rader med paneler monterats avsevärt mycket tätare än i figur 4.10 ovan.



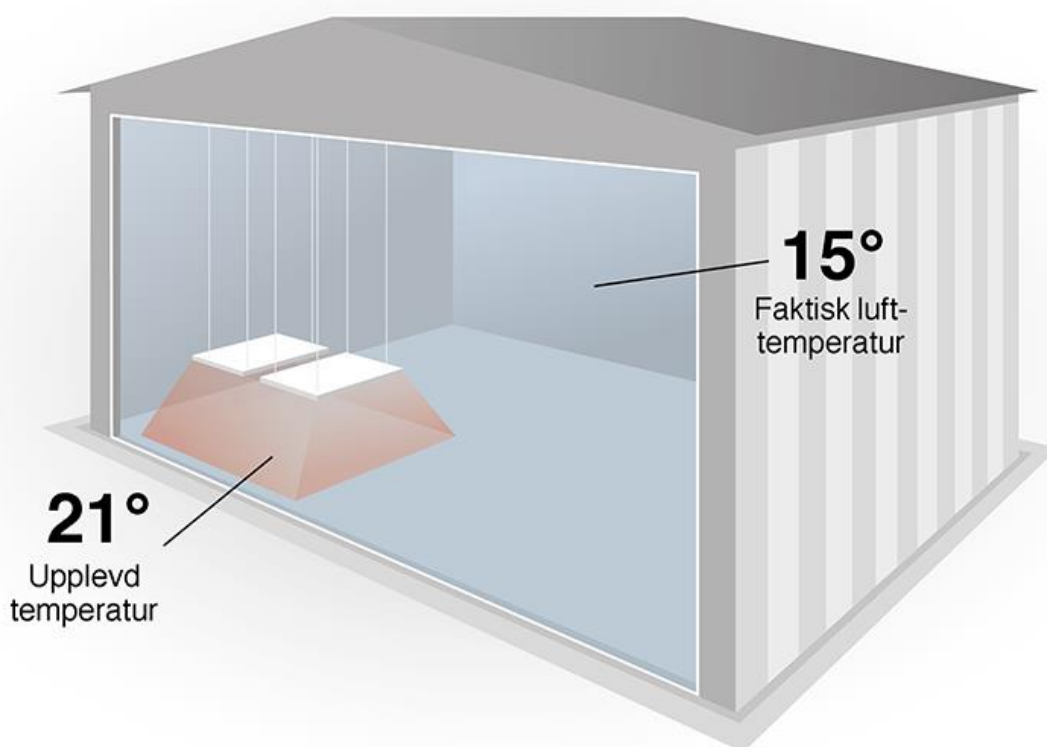
Figur 4.11: Lägsta rekommenderade installationshöjd som funktion av genomsnittlig medeltemperatur på takvärmepanelen.

4.5 Zonindelning

I många verksamheter vill man lokalt skapa ett klimat där temperaturen är högre än i resten av lokalen. Det kan exempelvis vara en kassa i en handelslokal där kunder har ytterkläder på sig eller en kontorsplats placerad i lager- eller fabriksmiljö. Här handlar det ofta om byggnader med stora luftvolymen där man vill hålla ner temperaturen. Det är väldigt kostsamt och i de flesta fall olämpligt att höja temperaturen i hela lokalen.

Med takvärmepaneler kan man skapa en zon med 5-6°C högre operativ temperatur än i resten av lokalen. Det görs helt fritt från drag och oljud eftersom det inte krävs fläktar för att sprida värmen. Bäst effekt erhålls om skärmväggar kan begränsa zonindelningen.

I zonindelning är det viktigt att montera panelerna på en höjd som är anpassad för storleken på den zon som önskas. Ett för högt montage sprider den installerade effekten över en för stor yta och intensiteten blir lägre.



Figur 4.12: Exempel på zonindelning med nedpendlade takvärmepaneler. Upplevd temperatur = operativ temperatur.

5 Klimat- och energisimuleringar för olika uppvärmningssätt

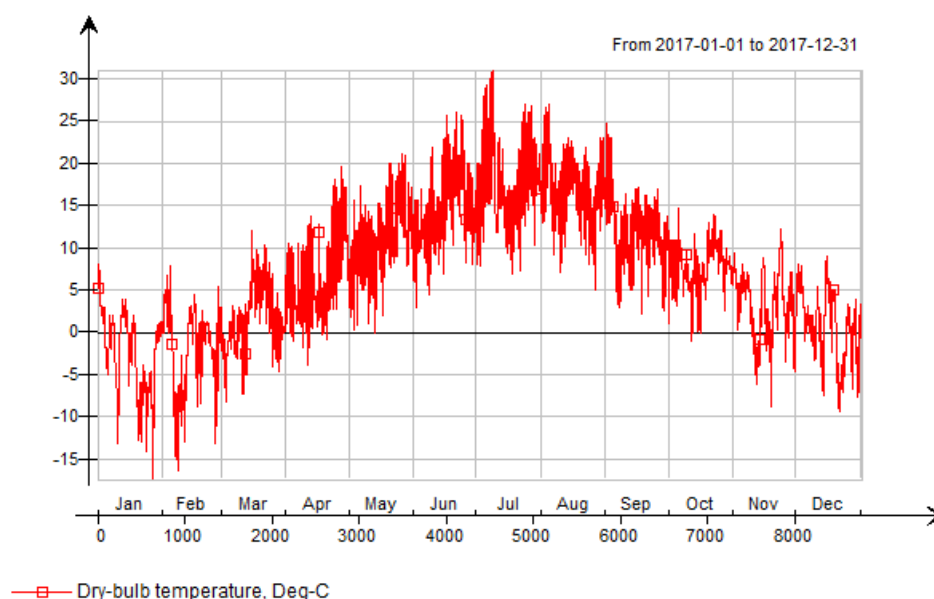
5.1 Inledning

Som beskrivits i teoriavsnittet är det inte bara lufttemperatur som är viktigt när man projekterar värme-/ kylsystem i byggnader. Termiska komfortfaktorer som PPD- och PMV-index, operativa temperaturen och temperaturgradienten är viktiga parametrar som kan påverka valet av uppvärmningssätt vid projektering.

5.2 Beskrivning av beräkningsmetod

Simuleringsprogrammet IDA ICE 4.8 är ett frekvent använt program för beräkning av termisk komfort för olika typer av lokaler och värmekällor. Programmet möjliggör simuleringar för att säkerställa lägsta möjliga energianvändning och bästa möjliga komfort.

I simuleringarna som presenteras nedan har IDA ICE 4.8 använts med klimatdata för Stockholm/ Bromma. Programmet använder normaliserade klimatdata med hänsyn till lufttemperatur, fuktighet, solinstrålning och vindhastighet. Temperaturprofilen som används i energiberäkningen visas nedan. Simuleringen genomförs för ett helt kalenderår.



Figur 5.1: Lufttemperatur under ett kalenderår i Bromma.

Tre typer av lokaler har valts för jämförelsen – kontor (3 m takhöjd), skola (takhöjd 4 m) och en 6 m hög hall. Simuleringsmodellen används för beräkning av lufttemperaturens börvärde, PPD-index och energiförbrukningen för olika typer av värmesystem. PPD 10% väljs som utgångspunkten för dimensionering av systemet.

Alla simuleringsmodeller har följande indata:

U_i (W/m ² K)	Byggnad med annat uppvärmningssätt än elvärme
U_{tak}	0,13
$U_{\text{vägg}}$	0,18
U_{golv}	0,15
$U_{\text{fönster}}$	1,3
$U_{\text{ytterdörr}}$	1,3

Tabell 5.1: U-värden enligt BBR25 avsnitt 9:4

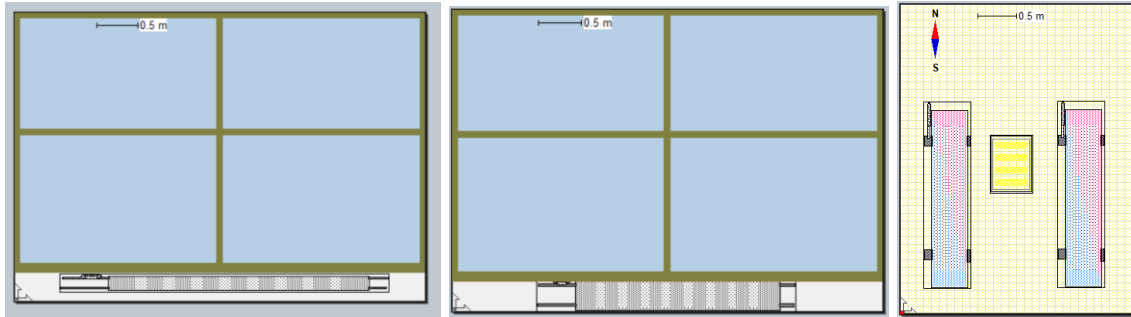
- Systemtemperatur: 55/45 för kontor och skola, 80/60 för hallen
- CLO: 1
- MET: 1,2
- Lufthastighet i vistelsezonen: max 0,15 m/s
- DVUT (Dimensionerande vinterutetemperatur): -20°C

5.3 Simulering för kontor

Simuleringar har gjorts för tre olika typer av kontorslokaler: cellkontor, landskap och ett hörnrum.

För samtliga kontorslokaler har simuleringar gjorts med tre olika uppvärmningssätt: Panelradiatorer (Modul Compact H400 mm), Konvektorer (Lisa H210 mm) och takvärmepaneler (CASA Plan L2400 mm).

Exempel på placering av värmare i cellkontor vid simulering.



Figur 5.2: Vänster: Lisa H210 placerad under fönster. Mitten: MC H400 placerad under fönster. Höger: Takvärmepaneler Casa Plan 2400 vy underifrån. (gula fyrkanten avser takbelysning)

Resultat simuleringar kontorslokal

Redovisade börvärde för lufttemperatur och operativ temperatur avser utfall för simulering vid DVUT, d.v.s. -20 C.

	Cellkontor 12m2					
Klimat Vinter	Transmission [20°C] W	Börvärde Lufttemp, °C	Operativ temp, °C	PPD index %	Energivärme kWh/år	Energibesparing om takvärme används
Radiatorer (MC H400 mm)	543	22,0	20,9	10	512	6%
Konvektorer (Lisa H210 mm)		22,2	20,9	10	517	7%
Takvärme (Casa Plan L2400 mm)		21,4	21,0	10	483	

Tabell 5.2: Cellkontor

	Kontorslandskap 60m2					
Klimat Vinter	Transmission [20°C] W	Börvärde Lufttemp, °C	Operativ temp, °C	PPD index %	Energivärme kWh/år	Energibesparing om takvärme används
Radiatorer (MC H400 mm)	2661	22,4	20,8	10	2783	11%
Konvektorer (Lisa H210 mm)		22,6	20,8	10	2830	12%
Takvärme (Casa Plan L2400 mm)		21,4	21,0	10	2489	

Tabell 5.3: Kontorslandskap

	Kontor, hörn 25m2					
Klimat Vinter	Transmission [20°C] W	Börvärde Lufttemp, °C	Operativ temp, °C	PPD index %	Energivärme kWh/år	Energibesparing om takvärme används
Radiatorer (MC H400 mm)	1792	23,0	20,8	10	2685	8%
Konvektorer (Lisa H210 mm)		23,2	20,8	10	2719	10%
Takvärme (Casa Plan L2400 mm)		21,7	21,0	10	2459	

Tabell 5.4: Hörnkontor

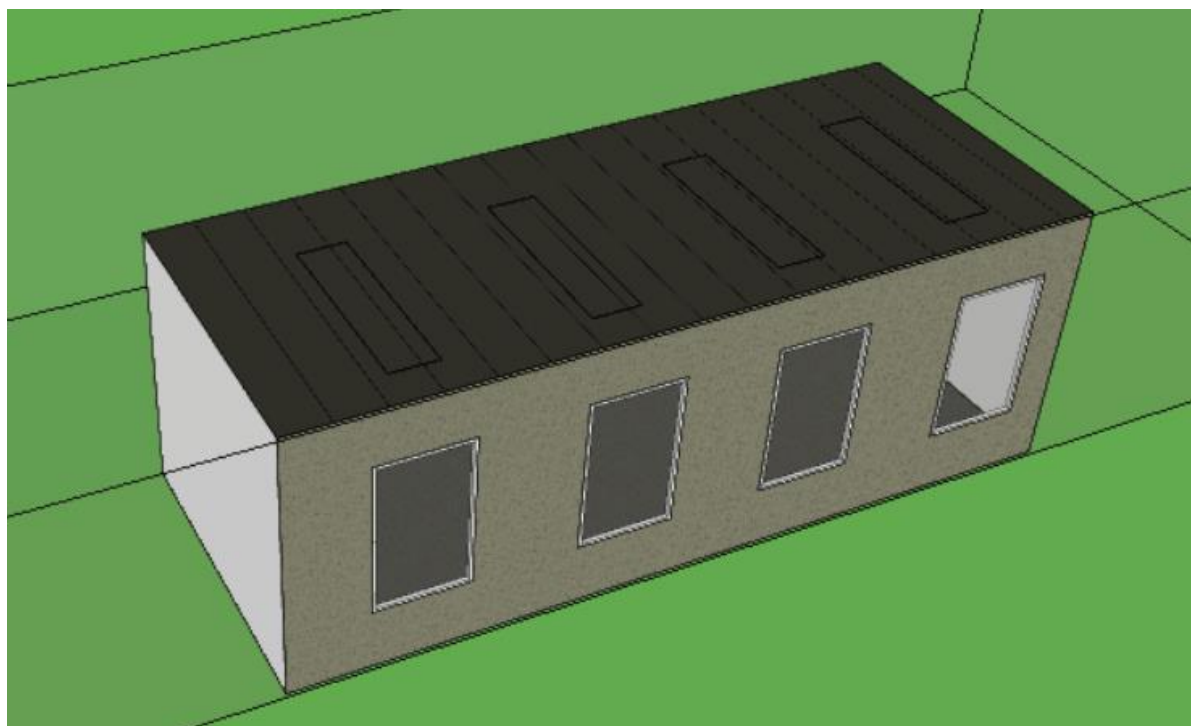
Resultatet visar att man med användning av takvärme i olika typer av kontorslokaler kan uppnå en hög nivå av termisk komfort med lägre börvärde på värmesystemet. En stor strålningsyta ger en komfortkänsla även vid -20°C utomhus. Detta resulterar i lågt PPD-index vid lägre lufttemperatur i rummet jämfört med andra uppvärmningssätt.

Lägre börvärde på lufttemperaturen leder i sin tur till minskning av energiförbrukningen för uppvärmning. Energisimuleringen visar att energibesparingen med takvärmepaneler kan bli upp till 12% jämfört med andra uppvärmningssätt.

Att radiator MC höjd 400 ger marginellt lägre energiförbrukning än Lisa H210 beror på att panelradiatorn har större strålningsyta och därmed kan ge samma operativa temperatur med något lägre lufttemperatur.

5.3 Simulering för skola

Simuleringen nedan avser ett rum i en skola med tre olika alternativa värmekällor – Radiatorer (Modul Compact H600 mm), golvvärme och takvärmepaneler CASA Plan L2400 mm.



Figur 5.3. Skola, rum på 40 m².

Resultat simuleringar skollokal

	Skola rum 40m2.					
Klimat Vinter	Transmission [20°C] W	Börvärde Lufttemp, °C	Operativ temp, °C	PPD index %	Energi värme kWh/år	Energibesparing om takvärme används
Radiatorer (MC H600 mm)	1494	21,8	21,0	10	1528	8%
Takvärme (CASA Plan L2400 mm)		21,0	21,0	10	1407	
Golvvärme*		20,8	21,0	10	1574	11%

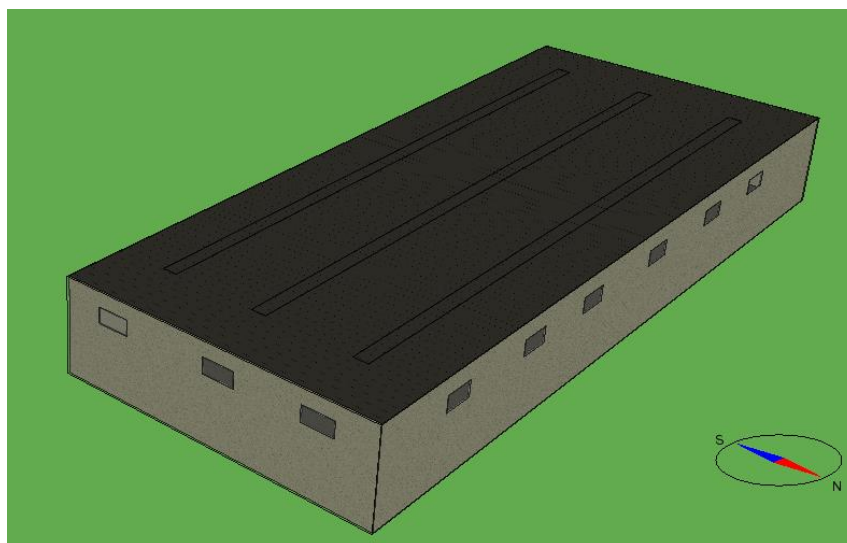
Tabell 5.5: Skola, rum på 40 m²

*Extra 300 mm isolering mot mark jämfört med BBR-krav.

Resultatet från simuleringen visar att man i fallet med golvvärme kan ställa ett lägre börvärde, men energiförbrukningen blir högre p.g.a. trögheten i styrningen av denna typ av system samt stora förluster mot marken. Uppvärmning med Takvärme ger 8–11% lägre energiförbrukning under året.

5.4 Simulering för hall

Simuleringen nedan är för en hall som är 5000 m² och har 6 meter i takhöjd. Fyra olika typer av värmesystem har jämförts: radiatorer, takvärme, golvvärme och luftvärme.



Figur 5.4. Hall, 5000 m².

Resultat simuleringar hall

	Hall 5000m ² ; Höjd - 6m;						
Klimat Vinter	Transmission [20°C] kW	Börvärde Lufttemp, °C	Operativ temp, °C	PPD index %	Temperaturgradient °C Golv-Tak	Energi värme MWh/år	Energibesparing om takvärme används
Radiatorer (MC 10-630)	86,3	21,5	21,0	10	20,5 - 27	215	20%
Takvärme (Arena)		20,5	21,0	10	19,9 - 21,2	173	
Golvvärme*		20,5	21,1	10	20,3 - 21,3	198	13%
Luftvärme		21,6	21,0	10	14,9 - 36,7	217+19**	26%

Tabell 5.6: Hall, 5000 m²

* Extra 300 mm isolering mot mark jämfört med BBR-krav. Vid energiberäkning har börvärde 21,0 använts (20,5 + 0,5°C) för kompensering av värmeförlust mot mark i enlighet med praxis.

** El till fläktar av cirkulationsvärmare, SFP-tal 0,1 (avser fläktens verkningsgrad. SFP-tal på 0,1 är en mycket effektiv fläkt)

Resultatet från klimatsimuleringarna visar att takvärme är ett mycket effektivt system för uppvärmning av stora höga hallar. Ett lågt börvärde och minimal temperaturgradient resulterar i stora energibesparingar jämfört med andra typer av system. I fallet med golvvärme blir energiförbrukningen högre p.g.a. trögheten i styrningen av denna typ av system samt stora förluster mot marken.

6 LCC analys, takvärmepaneler kontra fläktluftvärmare

En LCC-analys eller Life Cycle Cost analys är en ekonomisk analys där man tar hänsyn till kostnader och intäkter som en produkt genererar under dess livslängd. Analysmetoden kan användas för att se om en planerad investering är värd att genomföra men också till att jämföra ett antal olika produkter eller system för att se vilken som är mest lönsam över tid.

När man definierar livslängd kan man t.ex. utgå från ett systems ekonomiska- eller tekniska livslängd. Vi bestämmer själva över vilken tidsrymd som analysen ska sträcka sig över. Vi måste också noggrant tänka igenom vilka, och hur stora, kostnader och intäkter produkterna kommer att ge upphov till. Kostnader som är vanliga i en LCC-analys är inköpspris, installationskostnad, driftskostnad per år, underhållskostnad per år, skatter/avgifter per år, avvecklingskostnad och restvärde.

Vi måste också välja vilken kalkylränta som ska gälla i analysen. Detta är en förutsättning för att kunna göra en analys där kostnader och intäkter ligger olika i tiden. Kalkylräntan kallas ibland för diskonteringsränta och påverkar alltså hur vi värderar framtida kostnader och intäkter. I en LCC-analys skall kalkylräntan återspegla organisationens kapitalkostnad, d.v.s. kostnaden för att låna pengar. En LCC-analys har i första hand inte syftet att undersöka huruvida en investering är lönsam eller inte. En LCC-analys används främst för att jämföra olika alternativ oavsett avkastning.

LCC analysen är en uppskattning och blir mer osäker, känslig, ju längre livslängd som väljs. Det finns alltid antaganden som måste göras då det till viss del handlar om att bedöma vad som kommer att hända längre fram i tiden. Genom att begränsa analysen till vad som ska ingå samt att lägga ner arbete på rätt indata så kommer den att bli mindre känslig. Trots detta bör man göra en *känslighetsanalys* då resultatet är klart. Känslighetsanalysen visar hur resultatet av analysen förändras då värdet på olika ingående parametrar förändras, t.ex. energikostnad, inköpspris för en produkt eller installationskostnad.

Läs gärna mer om LCC-analys på [5]

<https://www.upphandlingsmyndigheten.se/omraden/lcc/>

6.1 Indata

I den här analysen har vi valt att jämföra takvärmepaneler med fläktluftvärmare (FLV) för att tillgodose värmebehovet i en industribyggnad på 5000m², 40x125m och 6 meters takhöjd. All data är hämtade från beskrivet exempel i kapitel 5.4, energisimuleringen är utförd i IDA ICE 4.8 med klimatfil för Stockholm/Bromma. Klimatkravet är som tidigare nämnts PPD-index 10%.

Analysen är begränsad till att jämföra val av uppvärmningssätt. Installationer så som shuntgrupper, undercentraler mm bedöms vara samma för de båda fallen och är därför inte med i analysen.

6.2 Projektering & dimensionering

Dimensioneringarna är inte enbart utförda för att täcka effektförlusterna. Vid projekteringen är hänsyn också tagen till att försöka uppnå komfortkrav med avseende på lufthastighet, operativ temperatur mm. Det gör att installationerna blir överdimensionerade om man enbart ser till vilken effekt de skulle kunna leverera. Webbaserade dimensioneringsverktyg har använts i båda fallen.

6.3 Förutsättningar

Analysen är uppdelad i följande poster för både takvärme och FLV:

- Investering, grundkostnad
 - o Material
 - Värmare
 - Installationsmaterial
 - o Installation
 - Leverans
 - Installation
 - Driftsättning
- Service & Underhåll, återkommande kostnad
 - o Schemalagt underhåll, filterbyten mm.
 - o Utbytesprodukter *
- Energikostnad, årlig kostnad
 - o Fjärrvärme
 - o El
- Deponi, avvecklingskostnad

* Då de två olika produkterna har olika teknisk livslängd blir det, vid en analys som sträcker sig över lång tid, aktuellt att byta ut FLV. Det handlar om en nyinvestering av produkter men är lagt under kostnaden Service & Underhåll. I ett scenario med kortare livscykel så reduceras den kostanden.

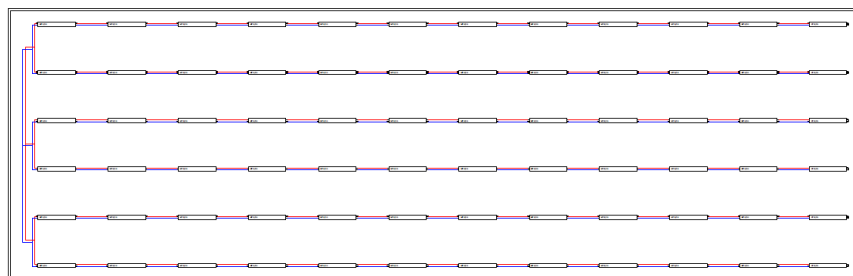
Förutsättningar som är gemensamma i analysen:

- Energipris, fjärrvärme: 650 SEK/MWh
- Energipris, el: 800 SEK/MWh
- Kalkylränta: 2%
- Energiprisökning: 2% per år
- Nyttjandetid: 20 år

6.4 Analysen

Alternativ 1 – Takvärmepaneler

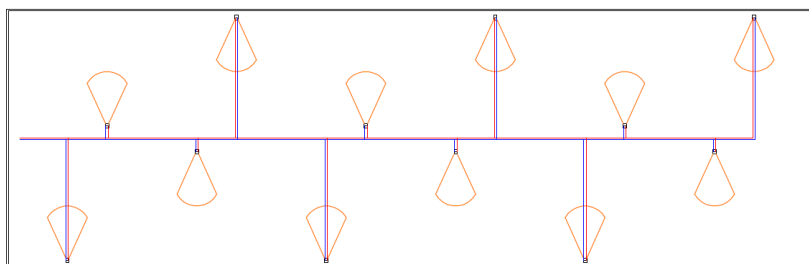
Totalt installeras sex rader á 72 meter värmepanel av modell Arena 615. Dessa är kopplade i tre zoner och styrs därefter. Anslutningspunkt beräknad i takhöjd vid ena kortsidan av byggnaden.



Figur 6.1. Föreslagen takvärmeinstallation.

Alternativ 2 – Fläktluftvärmare

Totalt installeras 12 stycken FLV försedda med filterlåda och individuell styrning. Värmeeffekten dessa kan leverera tillsammans överstiger långt behovet. Fläkthastigheten är nedställd för att inte skapa för höga lufthastigheter. Anslutningspunkten är den samma som i alt.1.



Figur 6.2. Föreslagen FLV installation.

Investeringskostnad:

Värmeinstallation:	Investeringskostnad (KSEK)
Takvärme	654
Fläktluftvärmare	471

Tabell 6.1

Investeringskostnaden ovan inkluderar materialkostnad och installationskostnad år 0, vid driftsättning av värmeinstallationen. Både produktpris och installationskostnad bedöms vara högre för takvärmepanelerna.

Service & underhållskostnad:

Kostnaden i tabell 6.2 avser den totalt (diskonterade) kostnaden för 20 år.

Värmeinstallation:	Service & underhåll (KSEK)
Takvärme	10
Fläktluftvärmare	169

Tabell 6.2

Den återkommande servicekostnaden för FLV består i filterbyten och enstaka byten av styrutrustning. Livslängden på enskilda FLV kan variera och i analysen byts 25% av antalet ut efter 10 år, 50% efter 14 år och de sista 25% efter 17 år. I sammanställningen ovan är endast kostnaden för ny produkt medräknat. Vi har således ej inkluderat arbetskostnaden för själva bytet.

Servicekostnaden för takvärmepanelerna beräknas vara låg och begränsas till byte av ventil, ställdon och eventuellt framtida injustering.

Energikostnad:

Värmeinstallation:	Energikostnad (KSEK)	kWh/år
Takvärme	2.205	173.000 värme
Fläktluftvärmare	3.063	217.000 värme + 19.000 el

Tabell 6.3

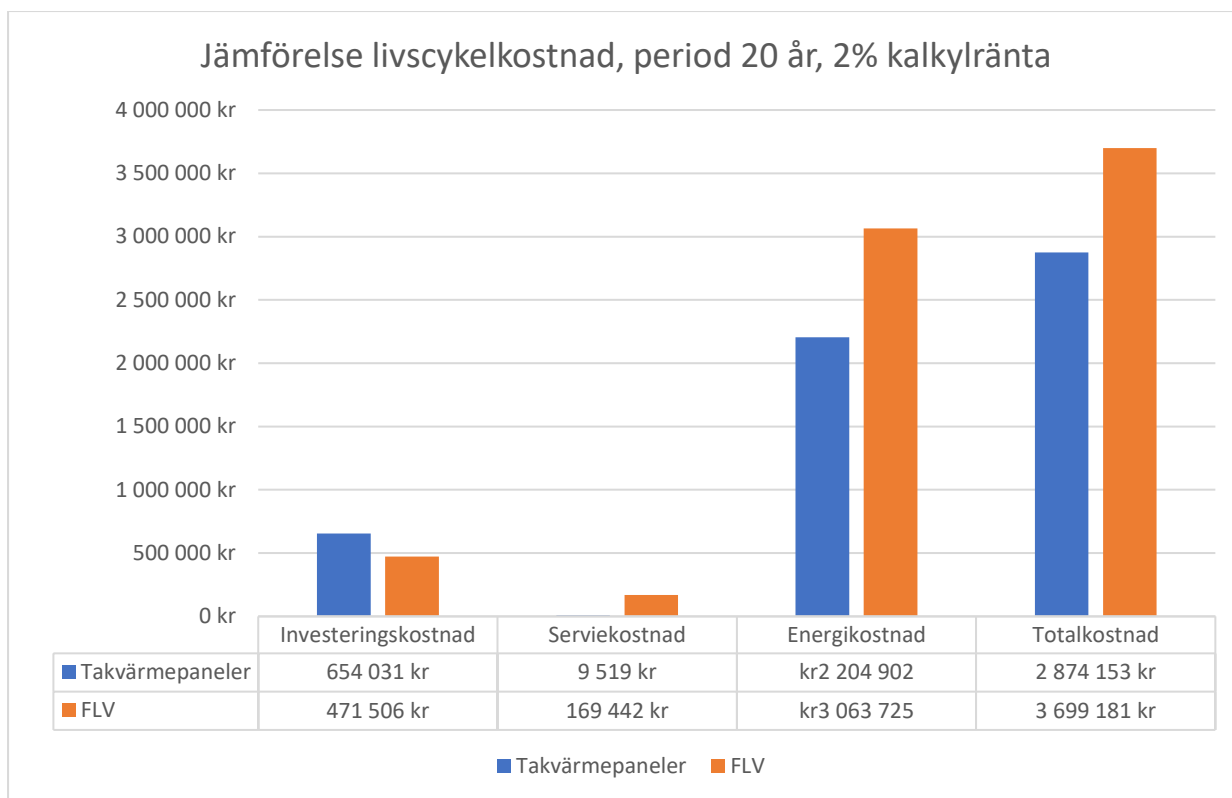
Genom att välja takvärme som uppvärmningssätt blir besparingen på energikostnaden 28% i förhållande till fläktluftvärmare. Det beror till största delen på den stora skillnaden i temperaturgradient mellan de olika uppvärmningssätten. Skillnaden i energikostnad är alltså direkt beroende av byggnadens höjd.

Totalkostnad:

Värmeinstallation:	Totalkostnad (KSEK)
Takvärme	2.874
Fläktluftvärmare	3.699

Tabell 6.4

I totalkostnaden är samtliga kostnader under perioden på 20 år inkluderade och beräknade, diskonterade, till ett nuvärde för respektive värmeinstallation.



Figur 6.3. Diagram för LCC-analys över 20 år

6.5 Slutsats LCC-analys

Genom att välja takvärme framför fläktluftvärmare för uppvärmning av aktuell byggnad gör man en energibesparing på 28% och en totalkostnadsbesparing på 22%. Besparingen motsvarar mer än 0,8 MSEK. Som vi ser i diagrammet ovan så är energikostnaden av absolut störst vikt sett över tid. Investeringskostnaden har över tid väldigt liten inverkan trots att den vid investeringstillfället är av betydelse.

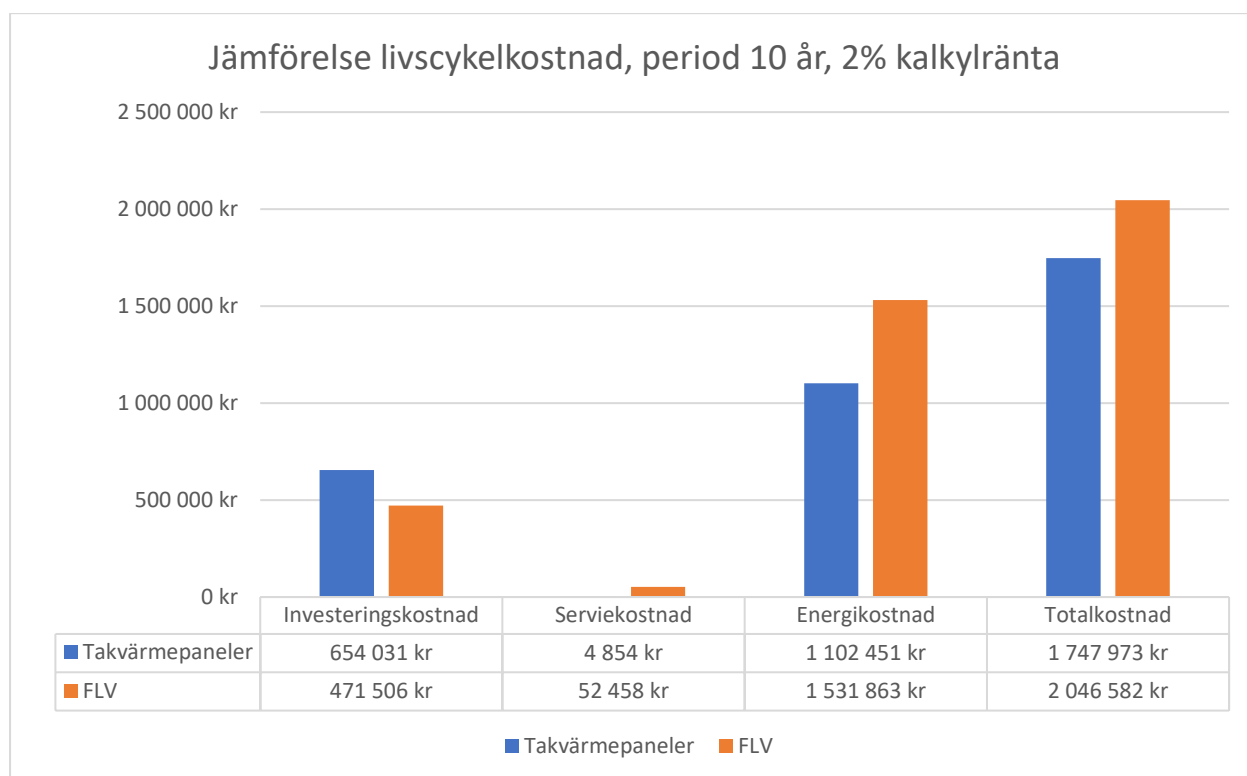
6.6 Känslighetsanalys

För att se hur analysen påverkas av olika indata och förutsättningar så utförs känslighetsanalyser. I grundanalysen ser man snabbt vilka kostnader som nämnvärt påverkar totalkostnaden. Det som kan vara svårare att se är hur vald livslängd eller kalkylränta påverkar analysen.

6.6.1 Livscykeltid

I exemplet nedan så har livscykeln halverats till 10 år, men i övrigt används samma indata och förutsättningar. Detta påverkar inte grundinvesteringen utan enbart kostnader som ligger längre fram i tiden. Grundinvesteringen utgör i detta fall en något större del av totalkostnaden. Den procentuella besparingen på energikostnaden är oförändrat 28% medan totalkostnadsbesparingen blir 15%. Även med 10 års livscykel är det alltså lönsamt att välja takvärmepaneler för uppvärmning.

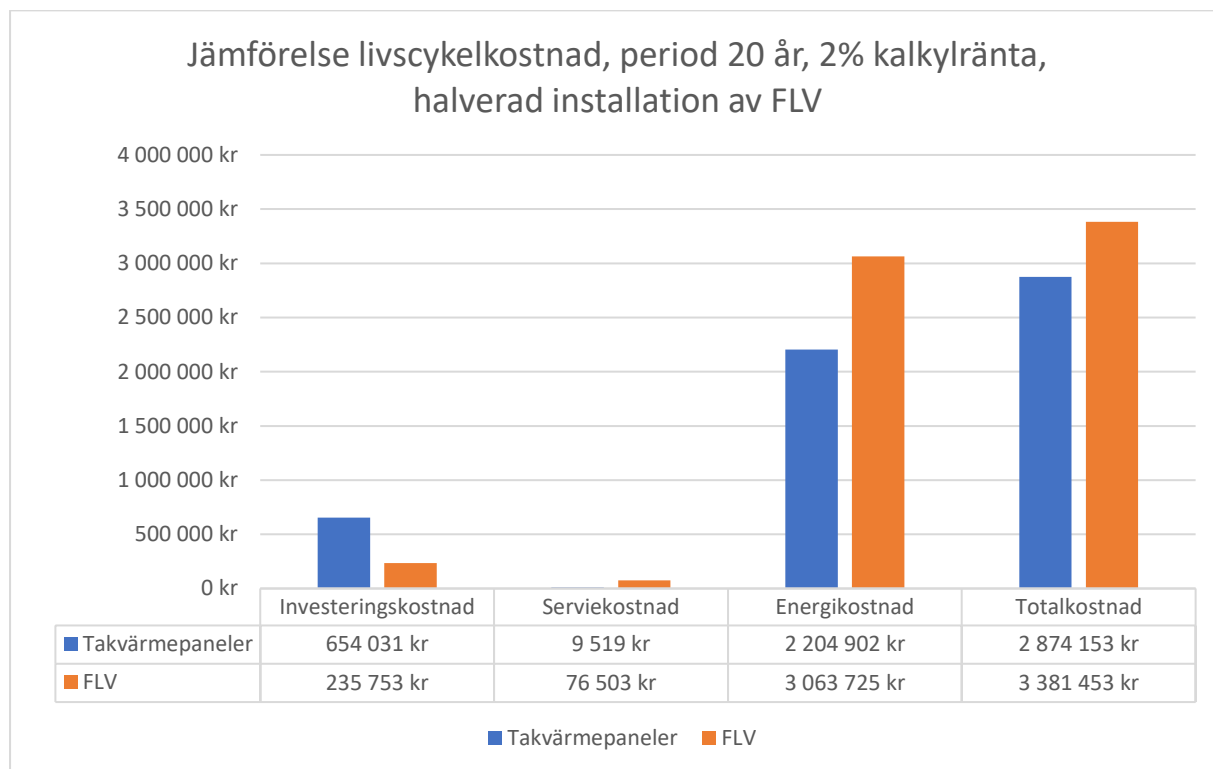
Vi bör samtidigt påpeka att 10 år är en ovanligt kort livslängd för en värmeinstallation. Många takvärmeinstallationer har hållit i mer än 30 år utan någon service eller utbyte.



Figur 6.4. Diagram för LCC-analys över 10 år

6.6.2 Grundinvestering

En ytterligare känslighetsanalys utförs och då med avseende på grundinvesteringen, i övrigt samma förutsättningar som i kap. 6.4. I detta exempel halveras investeringskostnaden för FLV så transmissionsförlusterna istället täcks av sex stycken värmare. Installations- och servicekostnader påverkas då antalet halveras medan energikostnaderna är konstanta eftersom effektbehovet är oförändrat. Den procentuella besparingen på energikostnaden är oförändrat 28% medan totalkostnadsbesparingen även här blir 15%.



Figur 6.5. Diagram för LCC-analys över 20 år och halverad installation av FLV mot analysen i kap. 6.4.

Givetvis är produkt- och installationskostnaden en faktor att räkna med men vi ser att den över tid inte är den avgörande faktorn till vilken värmeinstallation som är mest fördelaktig.

I alla analyser har simuleringsprogrammet IDA ICE använts för att beräkna energiåtgången i aktuell byggnad under ett års tid. Modellen uppfyller krav enligt BBR, Boverkets byggregler, och klimatfilen som använts bygger på insamlad statistik och sträcker sig över ett kalenderår. Tillförlitligheten i energiåtgångsberäkningen från IDA ICE får anses vara mycket hög då det är ett väl beprövat klimatsimuleringsprogram som används av stort antal teknikkonsulter i Sverige och internationellt. Programmet har validerats mot ett flertal standarder för klimatsimuleringar så som ASHREE 140, CEN Standard 13791, LEED, BREEAM m.fl. Flera projekt som uppförts verifierar också programmets tillförlitlighet.

7 Slutsatser / Fördelar med takvärme

Passar alla värmekällor	Man kan välja takvärme oavsett vilken värmekälla som används. Så snart panelerna tillförs varmt vatten börjar de att avge strålningsenergi.
...och alla byggnader	Nästan. Endast i tornliknande byggnader är takvärme mindre effektivt. Men det gäller generellt för de flesta värmesystem.
Ekonomiskt	Takvärme har en låg investeringskostnad, är enkelt att installera och behovet av underhåll är minimalt. Livscykelkostnaden för ett takvärme-system blir därför lägre jämfört med andra system.
Lång livslängd	I princip håller takvärmepanelerna lika länge som byggnaden.
Sparar energi	Med strålningsvärme blir den operativa (upplevda) temperaturen högre än den faktiska rumslufttemperaturen. Detta gör att man kan sänka temperaturen i lokalen med flera grader utan att de som vistas där upplever det som kallare. Följden blir att kostnaden för uppvärmningen kan reduceras avsevärt jämfört med ett luftuppvärmt system.
Inget underhåll	Ett takvärmesystem innehåller inga rörliga delar eller motorer, bortsett från cirkulationspumpar som ingår i alla vattenburna värmesystem. Detta innebär att kostnaderna för drift och underhåll blir minimala.
Effektivt mot kallras	Strålningen från panelerna söker sig till kallare omgivande ytor, t.ex. ett fönsterparti. Fönsterytan värms upp effektivt vilket minimerar kallraset.
Ger varma golv	Strålningen från våra paneler värmer ytor som golv och väggar. Det ger sköna, varmare golv. Bra i förskolor där barnen leker på golvet.
Effektiv nattsänkning	Takvärmepaneler svarar snabbt på ändrade framledningstemperaturer. Det gör dem lämpliga i lokaler där man vill spara energikostnader genom att sänka temperaturen under de timmar då ingen verksamhet pågår. Med ett trögt golvvärmesystem är detta normalt inte möjligt.
Zonindelning	Strålningen från en takvärmepanel värmer endast de ytor som befinner sig direkt under eller vid sidan om panelen, vilket gör det möjligt att värma enstaka arbetsplatser utan att påverka omkringliggande ytor. Perfekt i t.ex. kassamiljöer och i lokaler med utspridda arbetsplatser. Zonindelning kan även vara effektivt i idrottshallar där endast delar av hallen används för tillfället.
Flexibelt	Skulle en förändring av verksamheten kräva flytt av väggar behöver man inte tänka på värmesystemet som är placerat i taket – och som dessutom är förhållandevis enkelt att flytta vid behov. Takvärme gör att ingen eller lite hänsyn behöver tas vid placering av inredning, maskiner eller annan utrustning. Jämfört med en golvvärmeinstallation så kan man bortse från problemet med håltagning i golvet.
Högt i tak, inget problem	Strålningsenergin från takvärmepanelen avges först när den träffar en kallare yta. Så länge luften i lokalen är normalt ren kan panelerna därför placeras på mycket höga höjder utan att energin går förlorad på sin väg ned mot golvytan.

Vandalsäkert	Placeringen högt i tak gör panelerna oåtkomliga för åverkan, en fördel i skolor och andra offentliga eller privata lokaler.
Låg temperaturgradient	Alla känner till att varm luft stiger, men vad få känner till är att luften skiftar sig olika beroende av uppvärmningsmetod och årstid. Detta kallas temperaturgradient och är ett mått på temperaturökningen per höjdmeter i en lokal. Strålningsvärme har en mycket låg temperaturgradient, 0,2-0,4°C per meter medan konvektorer och fläktluftvärmare har en hög temperaturgradient, 2-2,5°C per meter. För radiatorer är gradienten ca 1,2-1,7°C/m. I praktiken innebär detta att lufttemperaturen vid tak kan skilja avsevärt antal grader beroende av uppvärmningsform. Ju högre lufttemperaturen är, desto större blir transmissionsförlusterna genom takkonstruktionen. Vad detta betyder för uppvärmningskostnaden är uppenbart och framgår bl.a. i simuleringar och LCC-analysen.
Ett tyst system	Takvärmepaneler är helt tysta.
Inga luftrörelser/ Mindre damm	Till skillnad från konvektionsvärme ger strålningsvärme inte upphov till några luftrörelser. Med takvärme står man därför helt fri vid valet av ventilation, en stor fördel i lokaler som kräver god kontroll på luftrörelser. Detta innebär samtidigt att mängden damm som virvlar runt är mycket begränsat. En dammfri inomhusmiljö är bra för alla, särskilt för allergiker. Mindre damm innebär också mindre städbehov, bra i t.ex. bilsalonger.

8 Referenser

[1] Tina Rosenström, Möjligheter att påverka energiförbrukningen med hjälp av ytbeläggningars elektromagnetiska egenskaper

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/42720/Rosenstrom_Tina.pdf?sequence=1

[2] Mats Dahlbom & Lars Jensen, Reglering av värmesystem i flerbostadshus med individuell värmemätning

<http://portal.research.lu.se/ws/files/4072401/3173443.pdf>

[3] Karel Kabele, Energy Efficient Heating and Ventilation of Large Halls

http://energy-ind.com/my_doc/energyind/ESA/Ebook/RehvaGuidebook_125esb1%2C125esbb-11.pdf

[4] Miguel Benitez & Adam Goyeryd, Dagens Inneklimat – En granskning av Svenska riktlinjer för inneklimat

<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:858016/FULLTEXT01.pdf>

[5] <https://www.upphandlingsmyndigheten.se/omraden/lcc/>

[6] EMTF Förlag AB, R1, Riktlinjer för specification av inneklimatkrav