



CHALMERS



Naturlig ventilation

I svenska kontor

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik

JAMES STOCKS
AXEL LUNDQUIST

**INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH
SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2025
www.chalmers.se

EXAMENSARBETE ACEX20

Naturlig ventilation

I svenska kontor

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

JAMES STOCKS

AXEL LUNDQUIST

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för installationsteknik

Examinator Anders Trüschel

Handledare Torbjörn Lindholm, Charlotta Berggren ByDemand

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2025

Naturlig ventilation

I svenska kontor

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

JAMES STOCKS

AXEL LUNDQUIST

© JAMES STOCKS, AXEL LUNDQUIST, 2025

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola 2025

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för installationsteknik

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Omslag: Fönsterventilation på Kyrkbytorget, Göteborg

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Göteborg 2025

Naturlig ventilation
I svenska kontor

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik*

JAMES STOCKS

AXEL LUNDQUIST

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Installationsteknik
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Denna studie ämnar till att undersöka möjligheten för mer teknik som drivs av naturliga drivkrafter i svenska kontorshus. Undersökningen består av analyser av olika projekt i Sverige och andra länder med liknande klimat, och att genomföra en beräkningsstudie på ett kontorsrum där det redogörs för de viktigaste inneklimats-parametrarna. Beräkningsstudien analyserar två tekniska lösningar, fönstervädning och en ventilationskulvert. Båda dessa system har använts i moderna projekt i Sverige och Europa. Resultatet visar att under majoriteten av året uppnås kraven på luftflöde på 7 l/s per person och 0,35 l/s per m² (AFS 2023:12). Under perioder där kraven inte uppnås, framför allt under sommaren, är den naturliga drivkraften för låg. Om det inträffar kan det vara nödvändigt att använda sig av ett hybridssystem, där naturlig ventilation kombineras med mekaniska lösningar för att förstärka luftflödet.

Nyckelord: Självdrag, Kulvert, Inneklimat

Natural ventilation
in Swedish offices

Degree Project in the Engineering Programme

Civil Engineering

JAMES STOCKS

AXEL LUNDQUIST

Department of Architecture and Civil Engineering
Division of Building Services Engineering
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

This study aims to examine the possibility for more passive ventilation strategies in Swedish office buildings. By exploring different projects, both in Sweden and other countries with similar climates, and performing a numerical study on an office room, explaining the most important variables. The numerical study accounts for two natural ventilation strategies, window ventilation and an earth- to air heat exchanger. Both systems have been used on projects in Sweden and Europe. The results of the numerical study was that most of the year the Swedish demands for the indoor climate were met, but there is need for calibration of the systems and sometimes a hybrid solution is required.

Key words: Natural Ventilation, Earth tubes, Indoor demands.

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	V
BETECKNINGAR	VI
1 INLEDNING	1
1.1 Syfte	1
1.2 Avgränsningar	2
1.3 Metod	2
2 GRUNDLÄGGANDE OM NATURLIG VENTILATION	3
2.1 Vindens påverkan:	3
2.2 Termisk drivkraft	4
2.3 Föroreningar	5
2.4 Regler och rekommendationer	6
3 PASSIVA VENTILATIONSTEKNIKER	8
3.1 Fönstervädning	8
3.2 Ventilationsskorsten och solskorsten	11
3.3 Vindfångare	12
3.4 Mark-luft-värmeväxlare	14
3.5 Exempellösningar i kallt klimat	15
4 SIMULERINGAR	18
4.1 Generellt	18
4.2 Fönstervädning	20
4.3 Kulvert	28

5	DISKUSSION OCH SLUTSATS	35
5.1	Diskussion fönsterventilation	35
5.2	Diskussion kulvert	36
5.3	Begränsningar	37
5.4	Slutsats	38
6	REFERENSER	39

FÖRORD

Detta arbete är skrivet av Axel Lundquist och James Stocks. Vi studerar samhällsbyggnadsteknik på Chalmers Tekniska högskola. Examensarbetet markerar avslutningen på vår treåriga utbildning. Vi har jobbat med detta projekt från januari till juni 2025. Omfattningen av arbetet är 15 högskolepoäng.

Arbetet har inneburit litteraturstudier, datahantering och användning av programvara.

Vi vill ge ett tack till Charlotta Berggren på ByDemand, som inspirerat oss och gett oss den vägledning vi behövt. Vi vill också tacka Anders Trüschel och Torbjörn Lindholm som har varit nyfikna och stöttande under resans gång.

Göteborg juni 2025

Axel Lundquist, James Stocks

BETECKNINGAR

A = area (m^2)

h = höjd (m)

z = höjdskillnad (m)

V = volym

Q = effekt (Watt)

\dot{V} = volymflöde (m^3/s)

C_t = vintryckskoefficient

C_d = utströmningskoefficient

p = tryck (Pa)

Δp = tryckdifferens (Pa)

v = hastighet (m/s)

ρ = densitet (kg/m^3)

g = tyngdacceleration (m/s^2)

α = värmeövergångskoefficient ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

C_p = specifik värmekapacitet (J/kgK)

C_e = koncentration av förorening i uteluft

C_E = Jämviktskoncentration

1 Inledning

I dagens samhälle står vi inför en rad utmaningar när det gäller klimatförändringar. Byggssektorn står för 22,1% av våra globala utsläpp av växthusgaser (Boverket, 2022), och mekanisk ventilation står för 40% av kontorsbyggnaders energiförbrukning i EU (Chenari m.fl., 2016). Genom att använda naturkrafter som annars går till spillo kan utsläpp från byggnadens bruksskede begränsas. Historiskt har dessa naturfenomen använts i högre grad, då det inte fanns några tekniska alternativ.

Naturlig ventilation omfattar en rad olika tekniker, många av dem med anor som sträcker sig tusentals år tillbaka i tiden. För att utvärdera deras genomförbarhet i Sverige behövs det innovation och styrning som kan medverka till att självdragstekniker kan möta de strikta svenska reglerna för kontor och offentliga byggnader.

I södra och Centraleuropa finns flera exempel på hur passiva tekniker kan användas i kontor. Helt passiva hus samt hus som använder sig av hybridsystem. Kontorshus med passiva ventilationssystem har genomförts i Sverige, men det är ovanligt.

I denna studie undersöks olika tekniker som har använts under historien, vissa mer än andra. Litteraturstudiens syfte är att studera ämnet, från de grundläggande principerna bakom funktionen, till studier och projekt som genomförts. Studierna och projekten är främst utförda i central- och norra Europa. Genom en ökad förståelse för de tekniska systemen som tillämpats genomförs två numeriska simuleringar. Simuleringarna utförs för att ge en noggrann bild över hur olika inneklimatsparametrar beter sig i ett självdragssystem.

Genom att utgå från svenska byggregler och jämföra beräkningar och simuleringar med uppmätta data, blir det möjligt att dra slutsatser om när naturlig ventilation är tillräcklig – och när mekanisk ventilation är mer lämplig.

1.1 Syfte

Syftet med arbetet är att undersöka om krav på ventilation kan uppnås med enbart naturliga drivkrafter.

Litteraturstudien syftar till att ge en förståelse för de grundläggande samband för den naturliga ventilationens funktion, samt undersöka exempel som utnyttjar dessa samband. Litteraturstudien ger förutsättningar för två simuleringar av ett kontorsrum med hjälp av programvaran IDA ICE.

Simuleringarna som genomförs i detta arbete ämnar till att undersöka potentialen för naturlig ventilation i kontorshus i en sydsvensk kontext. Detta genom att undersöka två ventilationsstrategier, mark-luft-värmeväxlare samt fönstervädring.

Frågeställningar

- Vilka tekniker används vanligtvis vid naturlig ventilation, samt lämpar sig bäst till ett sydsvenskt klimat?
- Går det att uppnå svenska regler och rekommendationer för inneklimat i kontorsmiljö med enbart självdrag?

1.2 Avgränsningar

Studien kommer lägga särskild fokus på luftflöden, termisk komfort, koldioxidnivåer och relativ fuktighet i projekt med naturlig ventilation. Även om det finns andra faktorer att ta hänsyn till, kommer arbetet lägga fokus på dessa parametrar, som vanligtvis används för att utvärdera ventilationens funktion. Det finns tydliga regler och rekommendationer associerade med dessa faktorer.

1.3 Metod

I denna rapport undersöks fyra olika tekniker: fönsterventilation, ventilationskulvert, solskorsten och vindfångare. Även om vissa av dessa tekniker lämpar sig väl för att kombineras, kommer de i litteraturstudien att analyseras var för sig. I simuleringsdelen kombineras olika tekniker för att likna tidigare projekt som genomförts i Sverige och Europa.

Två av teknikerna – ventilationskulvert och fönsterventilation – kommer att granskas djupare med hjälp av simuleringsverktyget IDA ICE. För solskorsten och vindfångare baseras analysen i stället på en litteraturstudie. Storheterna som kommer vara fokus för detta arbete är: volymflöden, inomhustemperatur, relativ fuktighet och koldioxidvärden. Simuleringarna kompletteras med beräkningsmetod från litteratur.

2 Grundläggande om naturlig ventilation

Tryckskillnader ger upphov till luftflöden och de två naturliga drivkrafter som ger tryckskillnader är vindtryck- och temperaturdifferenser.

2.1 Vindens påverkan:

När det blåser på en byggnad skapas övertryck på lovartsidan och undertryck på läsidan, samt på taket. Både övertrycket och undertrycken skiljer sig beroende på höjd, det går att beräkna med Bernoullis ekvation (1) (Warfvinge & Dahlblom, 2010):

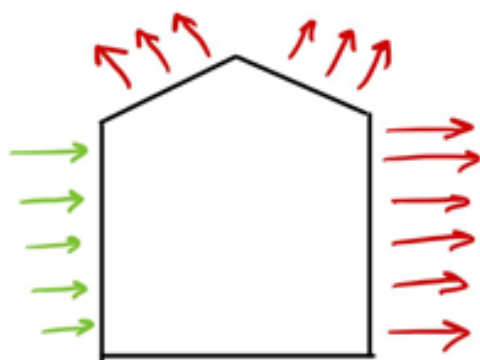
$$(p + h \cdot g + \frac{\rho \cdot v^2}{2})_{\text{l\ddot{a}ge 1}} = (p + h \cdot g + \frac{\rho \cdot v^2}{2})_{\text{l\ddot{a}ge 2}} \quad (1)$$

p = statiskt tryck (Pa)

h = höjd över referensplan (m)

v = strömningshastighet (m/s)

ρ = luftens densitet (kg/m³)



Figur 1 - Illustration av vindens påverkan på lovart- och läsidor.

Vindens påverkan på tryckskillnader beror på byggnadens form, vindhastighet samt fasadens riktning. Vid beräkning av vindtryck förenklas det till ett linjärt samband. Detta samband beror på formfaktorn, som ger vindtrycks-koefficienten C_t , vars värde utläses ur en tabell. C_t beror på vilken sida av byggnaden som är utsatt för blåst. Uttrycket för att beräkna vindtrycket på en utvändig byggnadsdel utifrån dessa praktiska värden är:

$$p_{vind} = C_t \cdot \frac{\rho_u \cdot v_{ref}^2}{2} \quad (2)$$

(Terpager Andersen m.fl., 2002)

För att bestämma det invändiga trycket i ett rum med korsdrag ställs en massbalans upp:

$$p_{inre} = \frac{1}{2} \cdot \rho_u \cdot v_{ref}^2 \cdot \frac{C_{t,1} \cdot (C_{d,1} \cdot A_1)^2 + C_{t,2} \cdot (C_{d,2} \cdot A_2)^2}{(C_{d,1} \cdot A_1)^2 + (C_{d,2} \cdot A_2)^2} \quad (3)$$

- ρ_u = uteluftens densitet (kg/m³)
- v_{ref} = vindhastighet vid referenshöjd (m/s)
- $C_{t,1}, C_{t,2}$ = vindtryckskoefficienter vid öppning 1 respektive 2
- $C_{d,1}, C_{d,2}$ = utströmningkoefficienter för öppning 1 respektive 2
- A_1, A_2 = öppningsarea på lovart- och läsidan

(Terpiger Andersen m.fl., 2002)

När det inre och yttre trycket har bestämts går sedan tryckskillnaden över en byggnadsöppning k att uttryckas som:

$$\Delta p_k = p_{vind,k} - p_{inre} \quad (4)$$

2.2 Termisk drivkraft

En essentiell drivkraft bakom luftflöde är temperaturskillnader, den termiska drivkraften (Petersson, 2018). Principen bygger på att när luft stiger i temperatur, så får den en lägre densitet. Detta leder till att varm luft stiger - skorstenseffekten. Temperaturvariationer orsakar tryckskillnader mellan olika nivåer på en byggnad. Dessa tryckskillnader kan beräknas enligt följande formel:

$$\Delta p_t = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot z \quad (5)$$

Δp_t = lufttryckdifferens, beroende av termik (Pa)

ρ = luftens densitet (kg/m³)

g = tyngdaccelerationen (9,81 m/s²)

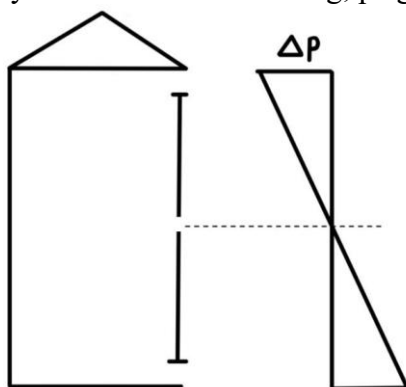
z = avståndet i höjdlid från nollnivån

Det går också att skriva sambandet som:

$$\Delta p = 0,0465 \cdot (T_{inne} - T_{ute}) \cdot z \quad (6)$$

(Petersson, 2018)

Tryckskillnadens fördelning, på grund av temperaturskillnader illustreras av Figur 2.



Figur 2 - tryckskillnadens fördelning över en fasad med jämnt fördelade öppningar.

Från ekvation (5) och (6) går det att utläsa att en större temperaturskillnad ger en större tryckskillnad. Detta fenomen leder till att luftflöden i ett självdragssystem är högre under kallare väderförhållanden, och lägre under varmare väder. Det finns därför en risk för överventilering under vintern och för låga volymflöden under sommaren (Warfvinge & Dahlblom, 2010).

Flödeskarakteristik för öppningar:

$$\dot{V} = C_d A \left(\frac{2\Delta p}{\rho} \right)^{1/2} \quad (7)$$

(The British Standards Institution, 1991)

När vindtryck och temperaturskillnader är kända går det att räkna ut volymflöden med Ekvation (7). Det är vanligt i självdragssystem att kombinera luftflöden genom vind och skorstenseffekt (Warfvinge & Dahlblom, 2010).

2.3 Föroreningar

Föroreningar är en stor utmaning när naturliga ventilationssystem ska utformas. Användning av filter i systemet är ett problem för många naturliga ventilationssystem då de orsakar tryckfall. Fönstervädring behandlar inte luften alls vilket innebär att luftkvaliteten inomhus beror på uteluftens kvalitet. Avsaknaden av filter i naturliga system innebär att koncentrationen av partiklar inomhus beror på koncentrationen utomhus. Den ungefärliga koldioxidhalten i uteluft i Sverige är 400 ppm (Naturvårdsverket, 2025).

I The British Standards Institution (1991) anges föreskrifter för koncentrationen av föroreningar i luft vid ett givet luftflöde, koncentrationen benämns c :

$$c = \left(\frac{\dot{V} \cdot C_E}{\dot{V} + q} \right) \cdot \left(1 - e - \left(\frac{\dot{V} + q}{V} \right) \cdot t \right) \quad (8)$$

Efter en tid, t , nås jämvikt i koncentrationen av föroreningen:

$$C_E = \frac{\dot{V} \cdot C_e}{\dot{V} + q} \quad (9)$$

Noterbart är att koncentrationen C_E är beroende av luftflödet men inte av rumsvolymen. Rumsvolymen påverkar enbart den tid det tar för koncentrationen att nå jämviktstillstånd. Volymflödet som krävs för att uppnå jämvikt ges av:

$$\dot{Q}_{\text{jämnvikt}} = q \cdot \left(\frac{1 - C_E}{C_E - C_e} \right) \quad (10)$$

- q = föroreningens flöde (l/s)
- V = rummets volym (l)
- \dot{V} = ventilationsflöde (l/s)
- C_E = jämviktsskoncentrationen
- C_e = koncentrationen av föroreningen i uteluft
- t = tid (s)

2.4 Regler och rekommendationer

De lagar som styr installationen i en byggnad regleras av plan- och bygglag (2010:900). Enligt 8 kap. 4§ Krav på byggnadsverk, byggprodukter, tomter och allmänna platser i Plan- och bygglag (2010:900) ska byggnader uppfylla följande tekniska egenskaper som kan kopplas till ventilation: lämplighet för avsett ändamål, energihushållning och skydd med hänsyn till hygien, hälsa och miljö (SFS 1994:847).

Boverket är den myndighet i Sverige som förtydligar och preciserar de lagar som rör byggande, planering och boende genom föreskrifter. BBR är Boverkets byggregler som innehåller föreskrifter och allmänna råd (Boverket, 2024). Föreskriften som främst tillämpas inom ventilation är BBR kapitel 6, där specificeras ventilationsflödet av uteluft till 0,35 l/s per m² golv-area (BFS 2011:6). Föreskriften i BBR hänvisar till Arbetsmiljöverket vilket främst reglerar ventilationen för arbetsplatser (Severinson, 2015).

I AFS 2023:12 4§ 5 kap. specificeras flöde av uteluft en arbetsplats behöver uppnå till 7 l/s per person samt 0,35 l/s per m² golv-area då personer utför stillasittande arbete. Gällande inomhustemperaturer beskriver AFS 2023:12 16§ "Arbetsplatser inomhus ska ha ett lämpligt termiskt klimat" och i ett allmänt råd hänvisar till Folkhälsomyndigheten (AFS 2023:12).

Folkhälsomyndigheten har givit ut allmänna råd om temperatur inomhus i HSLF-FS 2024:10 för bostäder och lokaler för allmänna ändamål. Där specificeras riktvärden för inomhustemperatur enligt Tabell 1.

Årstid	Lägsta operativa temperatur	Högsta operativa temperatur
Sommar	18 °C	26 °C
Vår	18 °C	24 °C
Höst	18 °C	24 °C
Vinter	18 °C	24 °C

Tabell 1 – riktvärden för operativ temperatur inomhus.

Luftens medelhastighet bör inte överstiga 0,15 m/s när inomhustemperaturen är under 24 °C (HSLF-FS 2024:10).

Enligt AFS 2023:14 är gränsvärdet för koldioxid i inneklimat 20 000 ppm. Koldioxid blir skadligt för hälsan vid dessa nivåer. Denna koncentration kan leda till att människors frekvens av andning störs, vilket kan leda till huvudvärk och ökar risken för medvetslöshet.

Rekommendationen för inneklimat från Folkhälsomyndigheten (2024) är att hålla koldioxidhalten under 1000 ppm. I kontorsmiljöer utgör människan den främsta källan till koldioxidutsläpp. Mänsklig andning ger upphov till utsläpp av cirka 15 liter koldioxid per timme i viloläge, exempelvis vid sängliggande. Utsläppen kan öka till omkring 120 liter per timme vid fysisk aktivitet.

Andra exempel på luftföroreningar som kan uppstå i byggnader är enligt Petersson (2018):

- Byggnadsmaterial som färger, lukter från flytspackel med mera
- Mikrobiologisk tillväxt på grund av fukt i konstruktionen
- Rengöringsmedel

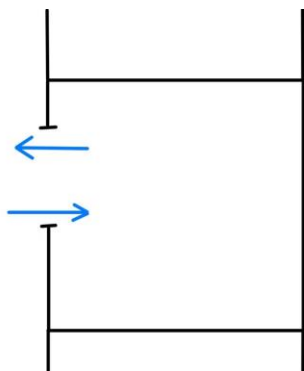
Dessa föroreningar kan leda till trötthet, huvudvärk, ögon- näs- och halsirritation bland annat.

3 Passiva ventilationstekniker

3.1 Fönstervädning

Ensidig ventilation

Ensidig ventilation innebär att både till- och frånluft flödar på samma sida av rummet. I Figur 3 visas ett rum med en stängd dörr och fönster mot fasaden. Vid denna typ av ventilation är luftströmmens penetrationsdjup begränsad. Som en tumregel bör ej rumslängden överstiga 2–2,5 gånger rumshöjden. För att få bättre effekt på luftflödet i resten av våningsplanet bör ensidig ventilation undvikas. Lösningar som möjliggör korsventilation leder till bättre luftflöden. Vid beräkning av självdragssystem är det vanligt, enligt Charlotta Berggren, VVS-ingenjör på ByDemand, att beräkna värden för ensidig ventilation, för att säkerställa ventilationens funktion oavsett om det är ensidig- eller korsventilation.

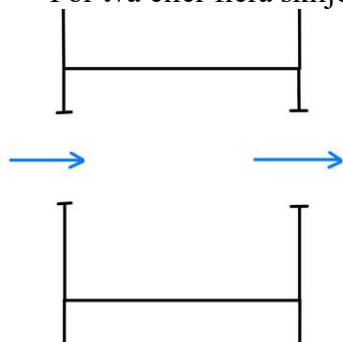


Figur 3 visar luftflöden i fallet med ensidig ventilation.

Korsventilation

Korsventilation, eller tvärdrag är beskrivet av Figur 4. Differenser i vindtryck, vilket kan ses i Figur 1, är dess främsta drivkraft. Skiljeväggar har en negativ påverkan på luftflöden, något som dock kan åtgärdas. Genom att skapa öppningar i innervägg, som ventiler, spjäll samt glaspartier med skjutdörrar går det att uppnå viss korsventilation i cellkontor (Terpiger Andersen m.fl., 2002). En tumregel från Terpiger Andersen m.fl. (2002) är:

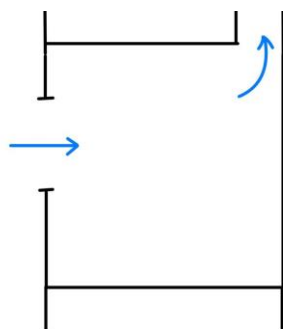
- För att volymflödet skall vara det samma med en skiljevägg, måste det finnas ett hål i skiljeväggen som är åtminstone två gånger större än ventilationsöppningen.
- För två eller flera skiljeväggar behöver hålen i dessa vara tre gånger större.



Figur 4 visar luftflödet i fallet med korsventilation.

Frånluftskanaler/ventilationsskorsten

Genom att ta vara på skorstenseffekten går det att utforma passiva frånluftskanaler. I äldre hus var det vanligt att ha en murad kanal, ansluten till en eldstad, som fungerar som frånluftskanal. Kanalen har ofta stora dimensioner för att minska luftmotstånd. Kanaler i självdragssystem bör utformas för att undvika tryckfall i största möjliga mån. Eftersom skorstenseffekten ger luftrörelse uppåt ska horisontella kanaler samt skarpa böjar undvikas (Warfvinge & Dahlblom, 2010). Denna teknik för frånluftsextraktion förklaras mer ingående i kapitel 3.2.



Figur 5 visar ventilation med en frånluftskanal, där luften flödar uppåt på grund av skorstenseffekten.

Nattkylning

Nattkylning innebär ventilation under natten, vilket lagrar kyla i stommen. Om konstruktionen utgörs av material med hög värmetröghet, kyls ytorna i rummet ner av den kallare nattluften. Detta medför en temperatursänkning i konstruktionen och ytorna inomhus. Effekten av detta är att temperaturen under dagen stiger långsammare. En vanlig metod för nattkylning är att kyla ned betong-håldäck i dess kanaler. Tjockleken hos konstruktionsdelarna behöver ej överstiga cirka 10 cm, då kylan vanligtvis inte kan tränga in mer än det (Petersson, 2018).

En studie från 2007 analyserade klimatdata från 259 väderstationer över hela Europa för att beräkna kylningspotentialen under nätter för juli månad. Sverige och Skandinavien hade en potential på 120-180 kWh under juli månad och studien fastslår att det är tillräckligt för att uppnå tillräcklig kylningseffekt hela året (Artmann m.fl., 2007).

Kylningspotential

I en studie av Yao m.fl. (2009) undersöktes potentialen för luftburen kyla i system med naturlig ventilation för kontorsbyggnader i Chinas olika klimatzoner. Klimatzonerna som är intressanta i detta arbete är "cold", "very cold" och "hot summer & cold winter", vilket representerar klimatet i Norden bäst.

Tre olika scenarier testades:

1. Kylning dagtid med uteluft.
2. Nattkylning genom att kyla byggnadens stomme.
3. Kombinerad dag och nattkylning.

Studien undersökte potentialen för luftburen kyla under de varma månaderna maj till september genom att simulera ett typiskt kontor på 19,4 m² och en höjd på 3 m. Studien presenterade sitt resultat genom att undersöka om det termiska klimatet upplevdes som acceptabelt av 80% eller 90% av personer som vistas där. Experimentet utfördes både med kors- och ensidig ventilation.

Slutsatsen av studien var att kontorshus i de kallaste klimat, "very cold", och användningen av dag- och nattkylning med korsventilation hade tillräcklig potential för att tillgodose kylningsbehovet under de varmaste månaderna. Enbart dag eller nattkylning i "cold" klimat var inte tillräckligt för att uppnå en acceptabel inomhustemperatur under de varmaste månaderna. Studien rekommenderade ett hybridsystem mellan självdrag och mekanisk ventilation under sommaren i klimaten "cold" och "hot summer & cold winter". I milda klimatzoner rekommenderade studien användningen av självdrag utan ett kombinerat system (Yao m.fl., 2009).

Fönster

Fönster är det vanligaste och enklaste sättet att skapa ett luftflöde inomhus. Upphängningen av fönstret har en inverkan på flödeskapaciteten. De vanliga sätten att hänga upp fönster är:

- Sidohängt fönster
- Bottenhängt fönster
- Vridfönster
- Toppstyrt fönster

Den fönstertyp som ger högst volymflöde, vid ensidig ventilation, är det sidohängda fönstret (Terpiger Andersen m.fl., 2002). Enligt Charlotta Berggren på ByDemand är en vanlig fönsterupphängning för fönstervädring ett bottenhängt ventilationsfönster högt upp i rummet, för att få ett godtagbart luftflöde och samtidigt minska känslan av drag.

Ventiler

Ventiler kan användas för både till- och frånluft. Det är vanligt att placera frånluftsventiler i badrum, för att avlägsna fukt. Tilluftsventiler är lämpliga att placera på första våningen, då öppna fönster på marknivå inte alltid är önskvärda från ett säkerhetsperspektiv. Friskluftsventiler är lämpliga för att ge ett bas-luftflöde.

Faktorer som är väsentliga för att säkerställa ventilers funktion:

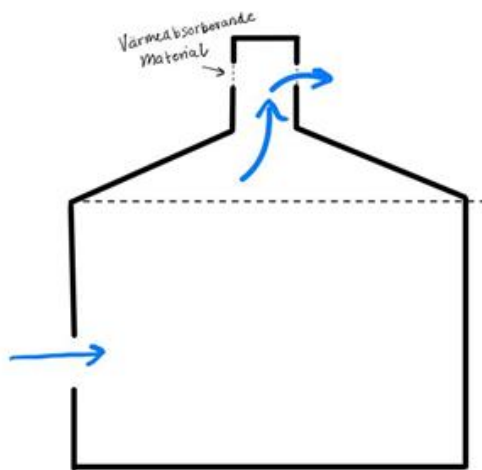
- Enkel montering och underhåll
- God ljudisolering
- Effektivt luftfilter
- Utformning som minimerar tryckfall
- Lufthastighet på under 0,15 m/s

(Terpiger Andersen m.fl., 2002)

3.2 Ventilationsskorsten och solskorsten

Solskorsten och ventilationsskorsten är båda väletablerade koncept inom naturlig ventilation. Det är två passiva ventilationstekniker som har använts i tusentals år (Eryener, 2020).

För fanns det värmepannor i hus som värmden upp ventilationskanaler. Detta bidrog till att skapa en temperaturdifferens som förstärkte byggnadens självdrag (Warfvinge & Dahlblom, 2010). En lösning för att få samma typ av temperaturdifferens är att ta vara på den värmeenergi som genereras av solen. Solskorstenar utformas ofta som i Figur 6, där värme absorberas högst uppe i solskorstenen vilket leder till luft rörelser, kombinerat med ett hål för frånluft (Terpiger Andersen m.fl., 2002). Värt att notera med dessa system är att frånluftsextraktionen blir svagare desto högre upp i huset som luftflödena genereras från (Terpiger Andersen m.fl., 2002). Sambandet mellan höjd och tryckdifferens går att se i ekvation (5).



Figur 6 visar en byggnad med en tilluftsöppning och en solskorsten.

Historiskt sett har solskorstenen ofta kombinerats med andra passiva ventilationslösningar, såsom vindfångare och öppningar i byggnadsstrukturen (Eryener, 2020). Ett exempel på en vindfångare med solskorsten är vindtornen i Iran, vilka kan dateras till 1300-talet. De tar vara på både vindtryck och temperaturdifferenser för att skapa en ventilationslösning. Ursprunget till denna tekniska lösning är omtvistat, både Iran och Egypten gör anspråk på att vara upphovslandet (Abdolhamidi, 2018). Vindfångare beskrivs i större detalj i kapitel 3.3.

Eryener (2020) beskriver de viktigaste parametrarna för solskorstenens verkningsgrad som: mängden solstrålning, solskorstenens höjd, temperaturdifferensen mellan inomhusklimat och toppen av solskorstenen, tryckdifferenser i byggnadens fasad, solskorstenens area och öppningar i fasaden.

Nackdelar med solskorsten enligt Eryener (2020) är:

- Oregelbundenhet, eftersom dess effektivitet är beroende av klimatet, vilket gör tekniken mindre lämpad för platser med mindre solstrålning.
- Hög komplexitet i projekteringen, det krävs en välgjord förundersökning för att säkerställa korrekt funktion.
- Avsaknad av standardlösningar, vilket innebär att varje solskorsten behöver en skräddarsydd lösning.

Höjden som krävs från en solskorsten kan göra den svår att uppföra i ett område med detaljplan som begränsar byggnaders höjd (Göteborgs Stad, 2025).

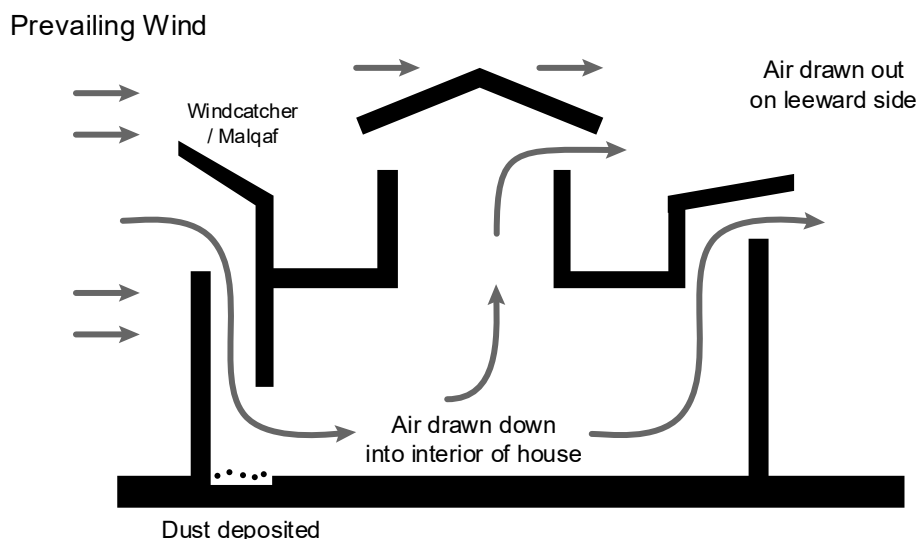
För att försäkra ett mer konsekvent luftflöde genom solskorstenar har det forskats på lösningar med inbyggd värmelagring. I en studie konstaterar Buonomo m.fl. (2019) att om en solskorsten är försedd med ett material som kan lagra värme, så kan den användas även under mindre gynnsamma förhållanden. I studien undersöks om fasomvandlingsmaterial (PCM) är ett lämpligt material för att lagra värme i en solskorsten. Användningen av PCM motiveras huvudsakligen av deras höga värmelagringskapacitet, vilket enligt författarna stöds av tidigare forskning. De refererar till en studie av Pasupathy et al. som har forskat på att inkorporera PCM i tak. Materialens förmåga att genomgå fasomvandling, i princip utan att ändra temperatur var något som ansågs ha hög potential att användas i kombination med naturliga ventilationssystem, där vädervariationer spelar en avgörande roll i inneklimatet.

Buonomo m.fl. (2019) utförde en numerisk analys av en tvådimensionell vägg med PCM som absorberande material, på byggnadens södra fasad. Systemet analyserades över tidsperioden 05:30-15:30 den 21 juni i Rom. Resultaten visade att PCM inte smälte helt, utan befann sig i fasförändring över tid. Inverkan på solskorstenen är att PCM absorberade värme under dygnets varma timmar och frigjorde värme under dygnets kallare timmar, vilket skulle leda till ett mer konsekvent luftflöde.

3.3 Vindfångare

Användningen av vindfångare som en metod för ventilation i byggnader är ingen ny uppfinning. Arkeologiska fynd visar att denna naturliga ventilationsmetod började användas i Iran redan för 6000 år sedan och har sedan dess spridit sig till flera länder i mellanöstern (Jomehzadeh m.fl., 2017). Vindfångarna hade inte endast ett tekniskt syfte utan var en del av kulturen och arkitekturen och det finns fler beundransvärda byggnader som står kvar idag. Ett bra exempel är på en badgir (vindfångare) är Dowlatabad-trädgården, Yazdi Iran som har ett vindtorn på över 33 meter, vilket är en del av UNESCO:s världsarvslista. Ett annat exempel på en vindfångare i Egypten som kallas Malqaf, är Bayt al-Suhaymi i Kairo. Detta hus från 1600-talet har en vindfångare på taket som leder ner kall uteluft i byggnaden (Archnet, 2025). Det finns flera olika typer av traditionella vindfångare som har olika utföranden men har samma funktion att leda in uteluft ned i byggnaden, se Figur 7. De kan byggas i torn eller monteras på taket eller använda dukar som segel för att leda in luften.

Oavsett utformning är vindfångarens huvudsakliga funktion är att fånga in vind och föra ner den i byggnaden samtidigt som inneluft avlägsnas. Drivkraften för denna process kommer ifrån från temperaturskillnader i luften (skorstenseffekten) samt skillnad i lufttryck orsakat av vinden. Övertryck skapas när vind blåser i taknivå mot vindfångaren vilket skapar ett positivt tryck på lovartsidan. På fångarens läsidor bildas det ett negativt tryck och det är denna differens som är drivkraften som trycker in tilluften i byggnaden och drar ut frånluften (Jomehzadeh m.fl., 2017). Skorstenseffekten är en bidragande faktor men vindtrycket står för 76% av luftflödet hos en vindfångare (Jomehzadeh m.fl., 2017).



Figur 7 visar en vindfångare, skapad av Fred the Oyster CC BY-SA 4.0 (2014).

Traditionella vindfångare kan delas upp i olika kategorier beroende på hur många sidor den har öppningar mot. En, två, fyra, och åttasidig samt cylindriska vindfångare är de fem vanligaste kategorierna (Sangdeh & Nasrollahi, 2022). Den ensidiga vindfångaren kan endast fånga in vind från en riktning och frånluften extraheras från ett annat ställe i byggnaden. Eftersom den endast har en öppning är den mindre flexibel än de flersidiga och fungerar bäst på platser där vinden ofta blåser från samma riktning (Jomehzadeh m.fl., 2017). Den tvåsidiga vindfångaren har en ledning för tilluft och en för frånluft. Vindfångare med 4 sidor används i områden där vinden varierar i sin riktning. Sex och åttasidiga används sällan i bostäder utan har sitt primära användningsområde i varma och torra klimat och används som vattenförvaring. Det finns fler varianter av former av fångarna som i sin tur har olika konfigurationer av bladen inuti som alla påverkar effektiviteten (Sangdeh & Nasrollahi, 2022).

Det finns flera parametrar att ta i åtanke när man designar en vindfångare. Den inre strukturen påverkas av storlek, antal sidor, blad och deras riktning samt höjden. Yttre faktorer som påverkar effektiviteten är landskapet, byggnadens tak samt hur byggnaden är utformad (Jomehzadeh m.fl., 2020).

Vindfångare som ventilationssystem är en beprövad metod i de varma delarna av världen men i kallare klimat är de relativt oprövade. I Storbritannien har det under de senaste 20 åren installerats över 7000 vindfångare på offentliga byggnader (Jomehzadeh m.fl., 2017).

3.4 Mark-luft-värmeväxlare

Mark-luft-värmeväxlare utgör en typ av ventilationslösning där tilluftskanaler placeras i marken för att nyttja jordens termiska egenskaper. Lösningen tar vara på jordens relativt stabila temperatur. En kulvert kan byggas i marken under byggnaden, vilket fungerar som en större värmeväxlare. Uteluften tempereras passivt innan den når tilluftsdon, vilket möjliggör passiv luftburen kyla under sommaren och uppvärmning vintertid (Darkwa m.fl., 2011).

Det termodynamiska sambandet som ligger till grund för kulverten samt kanalernas effektivitet är följande:

$$Q = \dot{V} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (11)$$

För att beräkna värmeväxlarens effekt används följande samband:

$$Q = \alpha \cdot A(T_2, T_1) \quad (12)$$

Q = värmeeffekt (W)

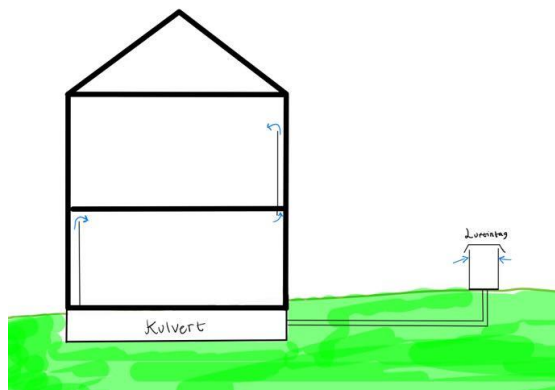
\dot{V} = luftflöde (m³/s)

C_p = specifik värmekapacitet (J/kg*K)

ρ = densitet (kg/m³)

α = värmeövergångskoefficient (W/m²K)

I ekvation (12) står A för ytan mellan marken och kulverten, T_1 för temperaturen i marken och T_2 för lufttemperaturen inne i kulverten (Göthberg & Andersson, 2010). Det går det att se att arean (A) och värmeövergångskoefficienten (α) är parametrar som går att påverka. Genom att justera storleken på kulverten, samt byggnadsmaterial går det att påverka mark-luft-värmeväxlarens effektivitet, och skräddarsy den för önskad effekt.



Figur 8 visar ett kulvertsystem med kanaler i mark samt ett luftintag utanför byggnaden.

I en studie från 2013 studerar Havtun och Törnqvist (2013) vilka parametrar som har störst inverkan på mark-luft-värmeväxlarens effekt. Parametrarna i fråga var:

- Kanalens längd (m)
- Kanalens diameter (m)
- Kanalens djup (m)
- Luftens strömningshastighet (m/s)

Studien som utfördes var en numerisk modell i programvaran Comsol Multiphysics 4a. Slutsatsen av studien var att längre kanaler, med lägre lufthastighet, mindre tvärsnitt och en fördjupad installation gav systemet en högre prestanda. Dock var påverkan av djupet försumbar efter 3,5 meter.

Ventilationskulvert-system samt markrör kan tillämpas med självdrag, samt i hybridssystem. Det kallas ibland förstärkt självdrag. Då används mekaniska drivkrafter för att kompensera när självdraget inte skapar tillräckliga flöden på egen hand. Ett hybridssystem i Sverige är Vargbroskolan i Storfors (Göthberg & Andersson, 2010). På denna skola används ventilationskulvert som en del i ventilationsstrategin för att effektivisera luftväxlingen, genom att kombinera naturliga och mekaniska drivkrafter. Uppmätta värden visade på att kulvertens tilluft var omkring 12–14°C på vintern och cirka 15–20°C på sommaren. De varmaste tilluftstemperaturerna var på dagar då utomhustemperaturen låg på ungefär 30 °C.

Under vintern bidrog kulverten till en förvärmning av ventilationsluften, och på sommaren bidrog den kallare temperaturen i kulverten till ett kylande luftflöde. Under sommarmånaderna värmdes marken upp och ledde till en högre lufttemperatur i kulverten. Det innebär att ett högre flöde erfordrades för att uppnå önskad operativ temperatur.

Flödet på Vargbroskolan beräknades baserat på arean för fläkthuset och luftens hastighet under året. Flödet för de två fläktarna i systemet varierade mellan ungefär 1 m³/s under juli och början augusti, till cirka 7 m³/s i juni. Detta beror på att kylbehovet är som störst i juni, och sommarledigheten innebär ett lågt kylbehov.

För att beräkna värmeeffekten som till- och bortförs på grund av tilluften via kulverten används ekvation (11), där flödet samt temperaturskillnaderna var uppmätta värden. Med denna data kunde Göthberg och Andersson (2010) räkna ut att under årets varmaste dag var kyleffekten från ventilationssystemet 107 kW. Under årets kallaste dagar kunde värmeeffekten från systemet beräknas till 82 kW.

Liksom andra tekniska system kräver markrör och kulvertssystem regelbundet underhåll. I dessa system finns en inneboende risk för mikrobiell tillväxt, som mögel, samt andra typer av föroreningar. Underhåll kan vara svårt, och åtgärder kan vara komplicerade, speciellt för nedgrävda markrör. Många felkällor kan uppstå redan under bygg- och installationsskedet. Underhållsbehov och svårighetsgraden är i hög grad beroende av markförhållandena (Duarte m.fl., 2023). Det är därför viktigt att beakta underhåll vid projektering av mark-luft-värmeväxlare. På Vargbroskolan gjordes en labbundersökning i kulverten, där det konstaterades att kanalen innehöll stora halter av mikroorganismer. Beiron (2010) som utförde studien rekommenderade att kulverten skulle städas var femte år för att begränsa dessa mikroorganismers uppkomst.

3.5 Exempellösningar i kallt klimat

En byggnads potential för att framgångsrikt ventileras med passiv ventilation avgörs av flera faktorer. Byggnadstyp, verksamhet, klimat och läge är alla faktorer som påverkar systemets funktion (Bamdad m.fl., 2022). De olika klimatzonerna på jorden har utmaningar och förutsättningar och kommer därför att påverka vilken metod och teknik som kan användas vid naturlig ventilation. Enligt De Dear och Brager (2002) är en operativ innetemperatur på 20-25°C ett bra riktvärde för naturlig ventilation.

Fönsterventilation villa i Danmark

Enligt en studie gjord på en tvåvåningsvilla i Danmark, visade simuleringar att naturlig ventilation med fönsterventilation och solavskärmning kunde minska behovet av mekanisk ventilation med 90% under sommarmånaderna (juni-aug) (Oropeza-Perez & Østergaard, 2014). Studien pekade även på att behovet av luftburen kyla i bostäder i Danmark troligtvis kommer att öka de närmaste åren och då är naturlig ventilation ett bra sätt att spara energi i byggsektorn.

Siemens kontor i Dortmund

Efter en brand på 90-talet ersatte Siemens kontorshus i Dortmund i Tyskland, sin fasad med ett dubbelfasadsystem. Fönstren i den inre fasaden blev öppningsbara och gjorde fönsterventilation möjlig. Den yttre fasaden var endast fäst vertikalt så att luft kunde röra sig fritt. Ingen annan ventilation eller kylsystem fanns i byggnaden förutom i restaurangen. Ventilationsstrategin som användes var: Dag- och nattkylning via fönster samt solavskärmning. Resultatet blev ett flöde med endast ensidig ventilation och vinklade fönster blev 30 m³/h per person vilket motsvarar ungefär 8,3 l/s per person (Pasquay, 2004).

Bang & Olufsens huvudkontor i Danmark

Bang & Olufsens huvudkontor i Struer, Danmark byggdes 1998 och består av tre byggnader. Två av byggnaderna används som kontor och är ventilerade med ett hybridsystem. Hybridsystemet består av vinddriven ventilation via fönsteröppningar som är lågt placerade nära bjälklaget på varje våning. Öppningarna är placerade i den norra fasaden och är automatiskt styrda. För att undvika drag värms tilluften till 18°C med ribbade värmerör i golvet. Tilluftsdonen är placerade i golvet och frånluften leds ut från taket genom de två trapphusen. På taket finns det fläktar som kan förstärka den naturliga drivkraften. Ventilationen är styrd via CO₂ och temperaturen som ett DCV-system (Demand controlled ventilation). Systemet är designat för en luftomsättning på 1,5h⁻¹ dagtid och 3 h⁻¹ under natten för att tillåta nattkylning. Under ett år var DCV-systemet i drift 15% av tiden. Hjälpfläktarna utnyttjades 10% av den tiden (Brohus m.fl., 2003).

Concept 22/26 kontorshus i Österrike

2226 är ett koncept för kontorshus som förlitar sig helt på naturlig ventilation. Ventilationsstrategin bygger på centralstyrda motoriserade ventilationsluckor som finns bredvid varje fönster. Byggnaden saknar även vätskeburen kylning och värme utan förlitar sig på en massiv konstruktion med god isolering för att erhålla ett gott termiskt klimat. Fasaden har en perforeringsgrad på 16% med inskjutna fönster för extra solavskärmning. Våningsplanen har en rumshöjd på 3,4 m. För väldigt låga temperaturer används belysningen i byggnaden som en extra värmekälla. Under sommaren används nattkylning i enighet med kapitel 3.1.4. Varje rum är utrustad med givare för avläsning av temperatur, relativ fuktighet samt CO₂-nivå.

Ventilationsluckorna öppnas när temperaturen i ett rum överstiger 26°C eller 1200 ppm CO₂ och stängs när temperaturen understiger 22°C eller 1000 ppm CO₂ (Junghans & Widerin, 2017).

Studien av Junghans och Widerin (2017) visade mätdata över de kallaste dagarna under 2015 och de varmaste dagarna under 2014. Mätningarna gjordes i de mest kritiska rummen. Under vinterdagarna understeg inte temperaturen den satta gränsen på 20°C med en relativ fuktighet på runt 40%. Under sommaren översteg innertemperaturen i de kritiska rummen gränsen på 26°C vilket enligt studien orsakades av värmelagring i taket. Rummen låg dock under temperaturgränsen under stora delar av sommaren.

4 Simuleringar

4.1 Generellt

Simuleringar för passiv ventilation har genomförts med IDA Indoor Climate and Energy version 5.1 som är skapat av EQUA Simulation AB. Objektet som studeras är ett kontor på första våningen. Kravet på luftflöde enligt AFS 2023:12 är totalt 20,2 l/s.

Byggnaden har samma dimensioner i båda simuleringarna, och båda system styr luftflödet efter temperatur, 20 °C är gränsvärdet för luftburen kyla i fönstervädningen och 22 °C för kulverten. Uteluftens koncentration av koldioxid är vald till 400 ppm, i enighet med den ungefärliga koldioxidhalten i Sverige som redovisas i kapitel 2.3.

Nattkylning används enligt principer i kapitel 3.1.4.

Kontoret

Kontoret som simuleras är ett cellkontor på första våningen av ett kontorshus med dimensionerna 18x45 (m). Kontorets golv-area är 17,7 m², och dess höjd är 3,0 meter. Hela byggnadens höjd är 18,6 m. Byggnaden har först modellerats i Autodesk Revit och sedan importerats in i IDA ICE.

Tabell 2 – byggnadsdelarnas konstruktion.

Konstruktionsdel	Konstruktionsmått (mm)	Tjocklek (mm)
Platta på mark	Spånskiva	16
	Isolering	40
	Betong	100
	Lätt isolering	100
Totalt		256
Yttervägg	Betong	150
	Lätt isolering	180
	Puts	25
Totalt		355
Innervägg	Gips	26
	Luftspalt	32
	Lätt isolering	30
	Luftspalt	32
	Gips	26
Totalt		146

Tabell 3 – konstruktionsdelarnas U-värden.

Konstruktionsdel	U-värde (W/m ² K)
Platta på mark	0,2
Yttervägg	0,2
Innervägg	0,6

Flödeskoefficient $C_d = 0,65$

Takhöjden är något högre än i ett konventionellt kontorshus, men byggnaden saknar helt ventilationskanaler som annars skulle kräva utrymme. Denna något högre takhöjd innebär en något förstärkt skorstenseffekt, vilket kan härledas från ekvation (5).

Värmesystem

Kontorsrummet är även utrustad med en vattendriven radiator med en effekt på 1000W och modelleras i IDA ICE som en förenklad modell. Radiatorn styrs via en termostat i rummet och är designad att avge maximal effekt vid en innetemperatur som understiger 20 °C.

Konstruktion

Konstruktionsdelarna som användes var standarder i IDA ICE.

Operativ temperatur

Operativ temperatur kombinerar luftens och kringliggande ytors temperatur, det används oftast för att beskriva upplevelsen av det termiska klimatet (Warfvinge & Dahlblom, 2010).

Plats

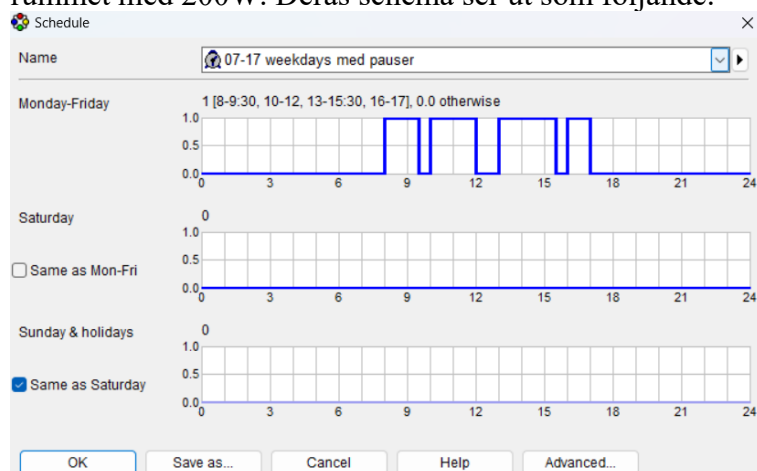
Huset antages vara placerat i en stadsmiljö med inställningen “semi-exposed”. Detta påverkar vindtryckskoefficienterna på byggnaden, vilket kan användas för att bestämma vindtrycket enligt ekvation (2).

Luftläckage

Luftläckaget antas vara normalt, med en luftomsättning på 0,5 h⁻¹ vid 50 Pa tryckskillnad. I verklig drift lär luftläckaget vara mindre, då tryckskillnaden oftast är lägre än 50 Pa. Detta innebär att luftläckaget sannolikt är mindre än vad som simuleras.

Interna laster

På kontoret är det två människor som arbetar, båda med varsin dator. De ger tillsammans upphov till 200W, och deras tekniska utrustning (datorer) värmer upp rummet med 200W. Deras schema ser ut som följande:



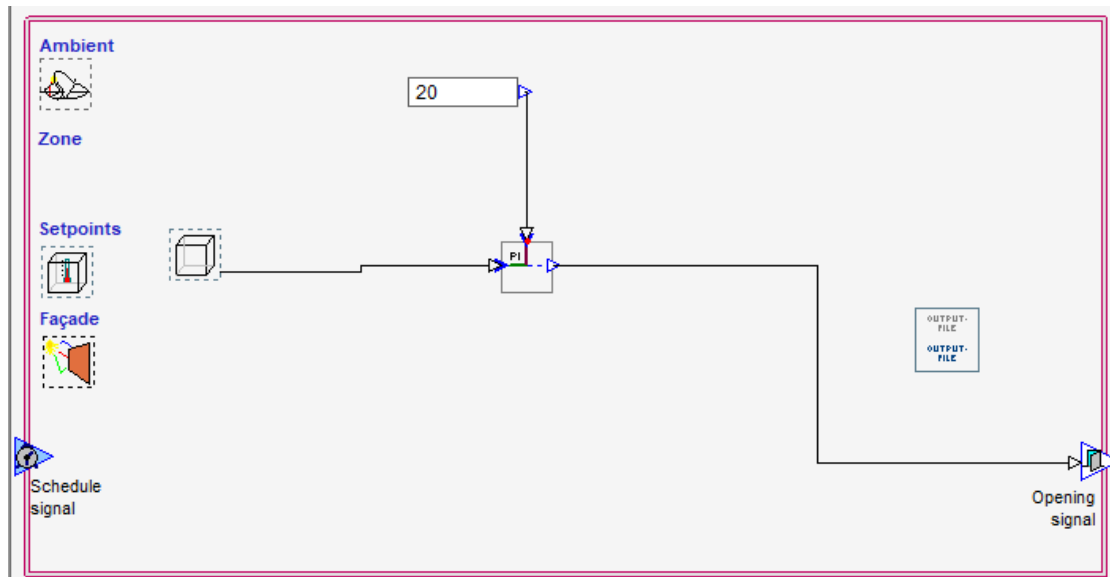
Figur 9 – schema för personer som jobbar på kontoret på vardagar, samt tar pauser för fika och lunch.

4.2 Fönstervädring

För att undersöka om fönsterventilation kan uppnå de svenska krav och regler som beskrivs i kapitel 2.4, genomfördes en simulering av kontorshuset i IDA ICE. Den typ av värderingsmetod som valdes var en ensidig ventilering via ett öppningsbart fönster och en frånluftskanal som modellerades i IDA ICE som en skorsten. Denna ventilationsstrategi har framgångsrikt använts av ByDemand i tidigare projekt.

I kontorets yttervägg simuleras två fönster. Det övre fönstret har måtten 1200x300 mm och är öppningsbart via en motor som styrs via programmet. Det undre fönstret är 1200x1500 mm och är alltid stängt under simuleringarna. Fönstertypen som valdes för de båda fönstren var av IDA ICE, fördefinierade "3 pane glazing, clear, 4-12-4-12-4 (example)". Solavskärmning via en nedfällbar fönstermarkis användes på det större fönstret under simuleringarna av sommarmånaderna. Markisen är motordriven och styrs centralt av programmet via ett schema. Markisen fälls ut vid 8:00 och dras in vid 17:00 de dagar kontoret är bemannat. Under de andra årstiderna används inte solavskärmning.

Vädringsfönstret styrs via en öppningskontroll som skapades i IDA ICE och genom att låta den operativa temperaturen vara den styrande faktorn skapades öppningsscheman. De ser olika ut för olika årstider på grund av uteklimatet. I Figur 10 går det att se att när zonen temperatur närmar sig 20, skickar givaren instruktioner till fönstret att öppna sig.



Figur 10 - styrning av fönsteröppning en genomsnittlig sommardag.

Dimensionerande uteklimat

Samtliga klimatdata är hämtad från SMHI, under året 2021 (SMHI, 2021). Data som använts är från SMHI Station ”Göteborg A (71420)”. Stationen är belägen i centrala Göteborg. Läge och höjd specificeras nedan:

Tabell 4 – väderstationens koordinater och höjd.

Latitud	Longitud	Höjd (m)
57,7156	11,9924	3,038

Fönsterventilation har testats på 4 olika datum. Dessa har bestämts enligt (Terpiger Andersen m.fl., 2002).

- För vintersäsongen analyseras det genomsnittliga väderförhållandet under ett januardygn.
- För vår- samt höstsäsongen analyseras den varmaste dagen i april och oktober.
- För sommarsäsongen analyseras både dygnet med högst medeltemperatur, och medeldygnnet för månaderna juni-augusti.

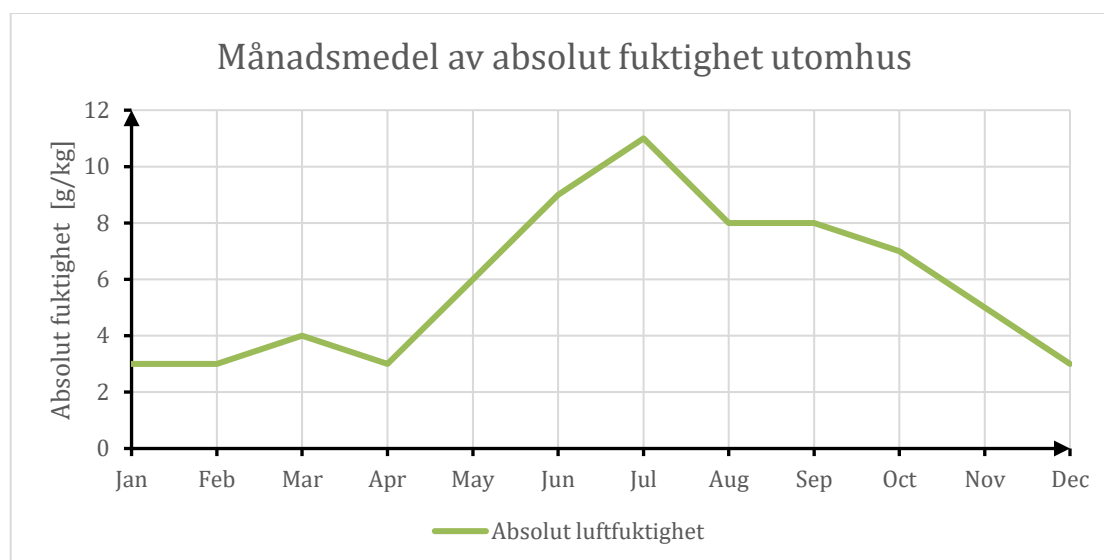
Vindriktningen som används för de olika dimensionerande dagarna är fastställda till 160 grader genom att ta medelvärdet för vindens riktning över åren 2014–2024. Vindhastigheten har beräknats för vår och höst genom att ta 25%-fraktilen av vindhastigheten över ett helt år enligt Terpiger Andersen m.fl. (2002). Vindhastigheten för vinter-simuleringen beräknades genom att ta 25%-percentilen av vindhastigheten från januari-februari 2021. Sommarens vindhastighet fastställdes genom att beräkna 25% percentilen av vindhastigheten för de dygn vars maxtemperatur översteg 20 °C.

Värdena i Tabell 5 lades sen in i en klimatfil, som sedan användes i IDA ICE.

Tabell 5 – vindhastighet och riktning.

Årstid	Vindriktning (°)	Vindhastighet, 25% percentil (m/s)
Vinter	160	1,1
Vår	160	1,1
Sommar	160	1,4
Höst	160	1,1

Absolut fuktighet uteklimat

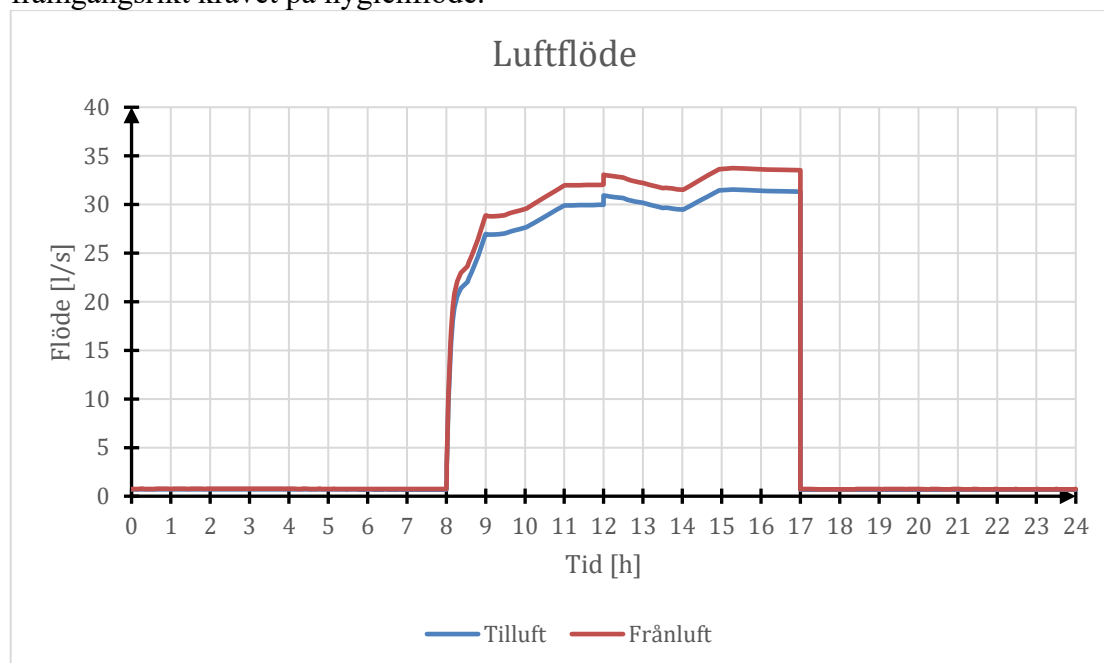


Figur 11. Absolut fuktighet i utomhusluft månadsmedel.

Den absoluta fuktigheten i Figur 11, är bestämd utefter uteklimatets relativa fuktighet och temperatur i ett Mollierdiagram.

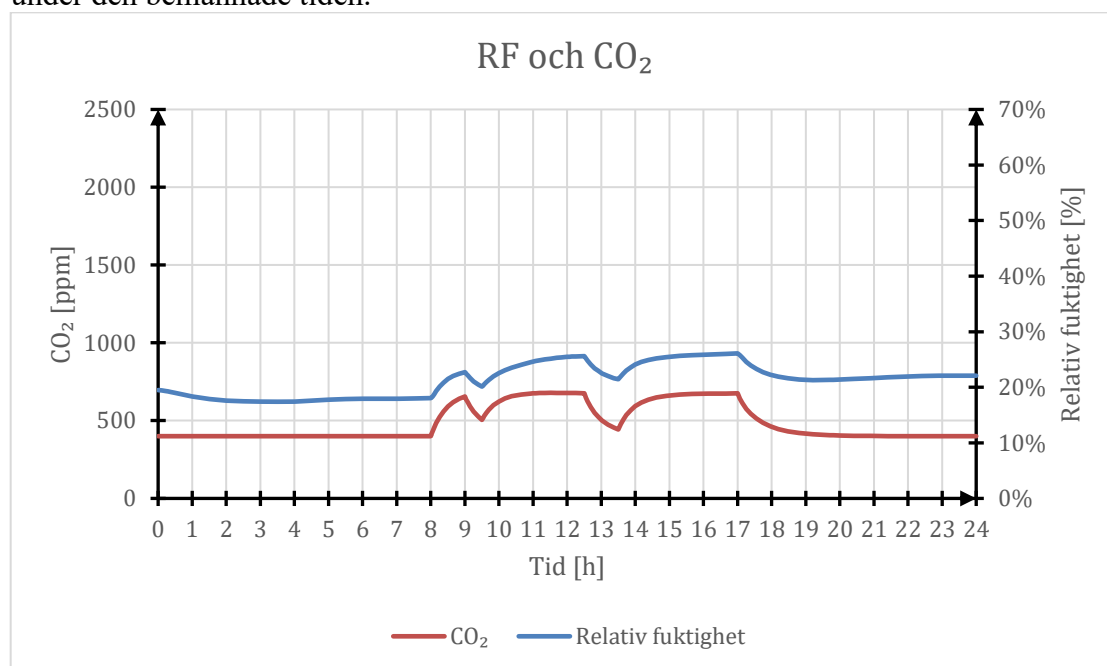
Vinter

Det dimensionerade vinterdygnet fastställdes till 2021-01-04. Dygnet hade en medeltemperatur på 0,3°C och medelvärdet av den relativa fuktigheten var 74%. Ventilationsflödet under det dimensionerande vinterdygnet, se Figur 12, uppnår framgångsrikt kravet på hygienflöde.



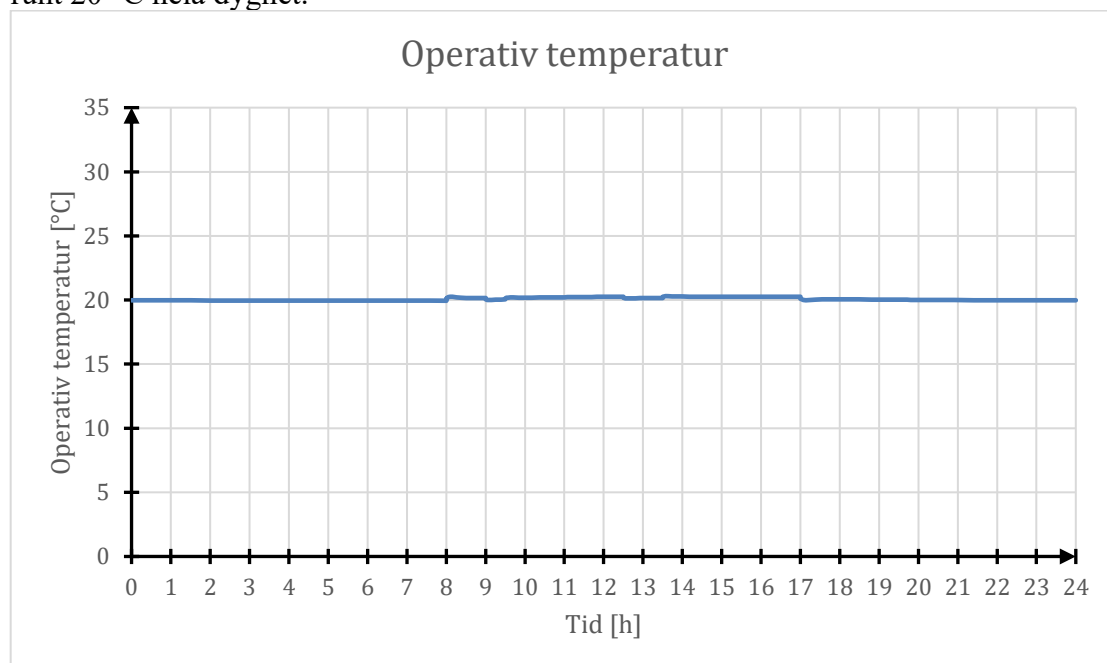
Figur 12. Ventilationsflödet för dimensionerande vinterdygn (2021-01-04).

Temperaturen i kontoret håller en jämn temperatur mellan 19–21 °C under det simulerade dygnet. Den relativa fuktigheten inomhus var låg under tiden kontoret var bemannat (08–17). Den genomsnittliga relativa fuktigheten beräknades till 23,9% under den bemannade tiden.



Figur 13 visar den relativa fuktigheten och den uppmätta CO₂-nivån under det dimensionerande vinterdygnet (2021-01-04).

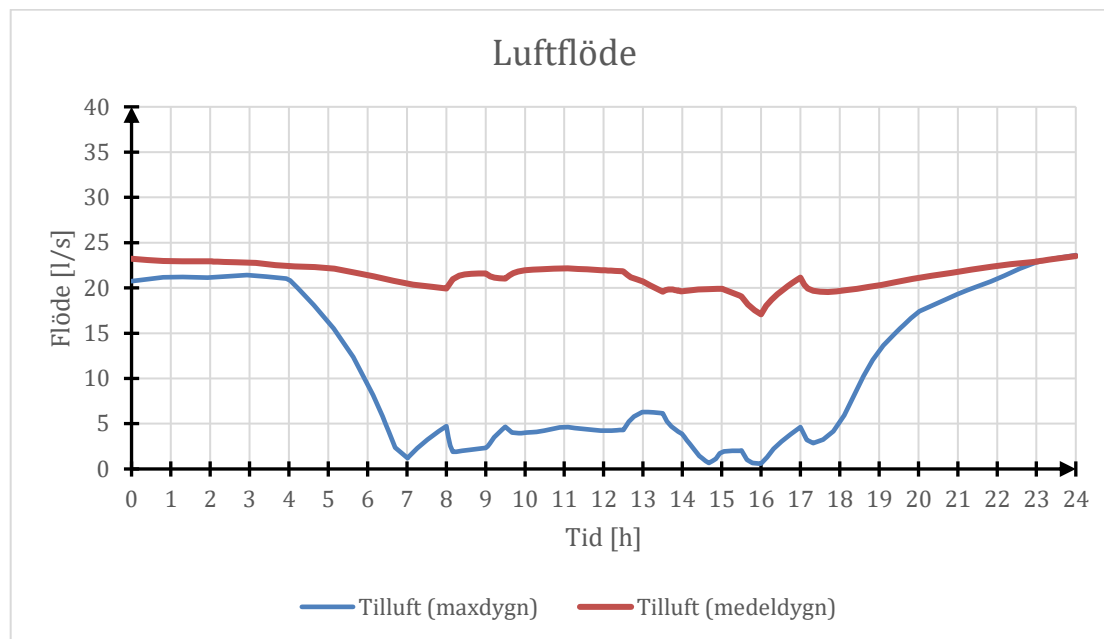
Figur 14 visar att den operativa temperaturen i kontorsrummet håller en stadig nivå på runt 20 °C hela dygnet.



Figur 14 visar den operativa temperaturen under vinterdygnet.

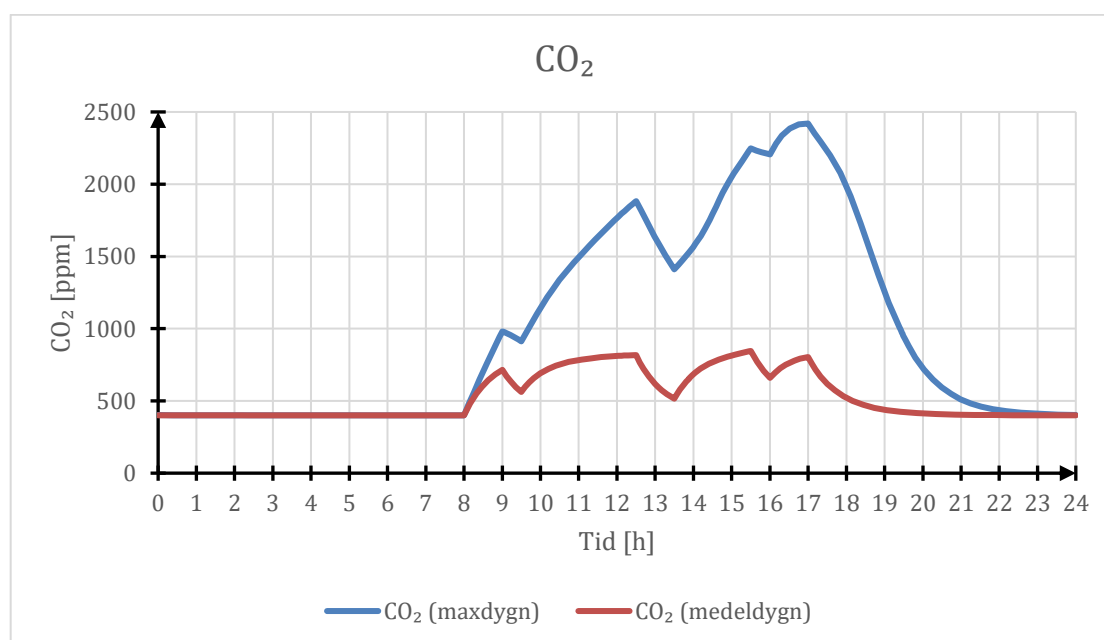
Sommar

För att kunna simulera ventilationen för de varmaste månaderna under året används två olika dygn. Medeldygnnet och maximumdygnnet. Medeldygnnet för sommar var 2021-07-11 och det maximala dygnet var 2021-07-16. Figur 15 visar att medeldygnnet håller ett jämnt flöde under hela dygnet med ett medelflöde på 21,4 l/s och med ett minimumflöde som uppmättes till 18,7 l/s klockan 16:00. Maxdygnet uppvisar ett lägre luftflöde, med ett medelflöde på 3,4 l/s under kontorstid.



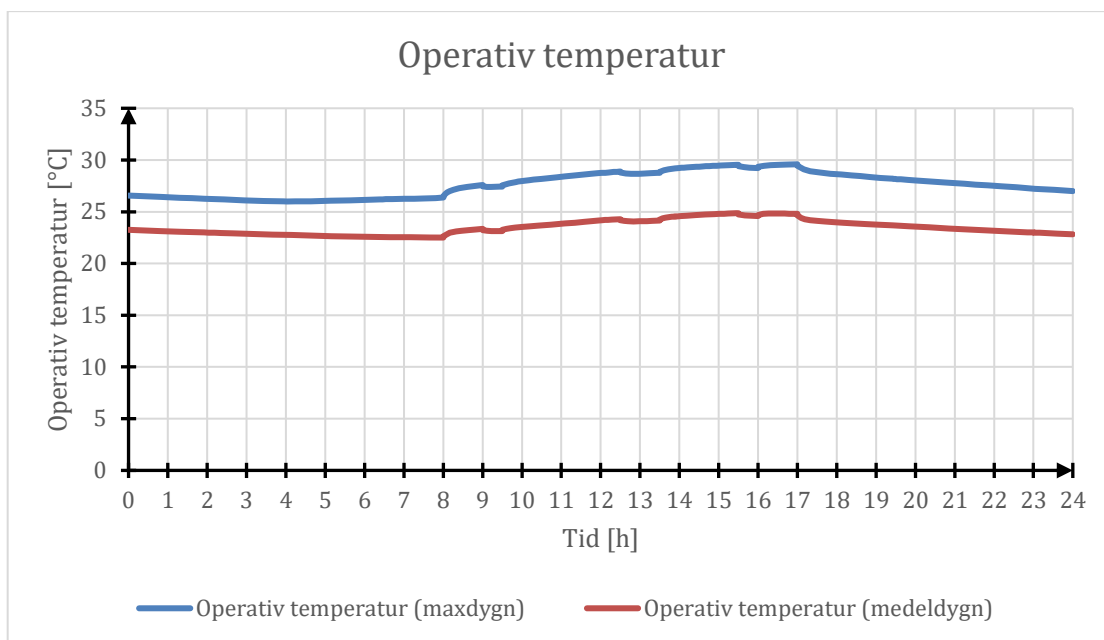
Figur 15 visar luftflödet under medel- och maximumdygnet under sommaren.

Sommarens max- och medeldygns CO₂-nivå visas i Figur 16. Maxdygnets medelvärde av CO₂ var 1185 ppm och medeldygnet medelvärde var 571 ppm.



Figur 16 visar halten av CO₂ i kontoret under medel- och maximumdygnet.

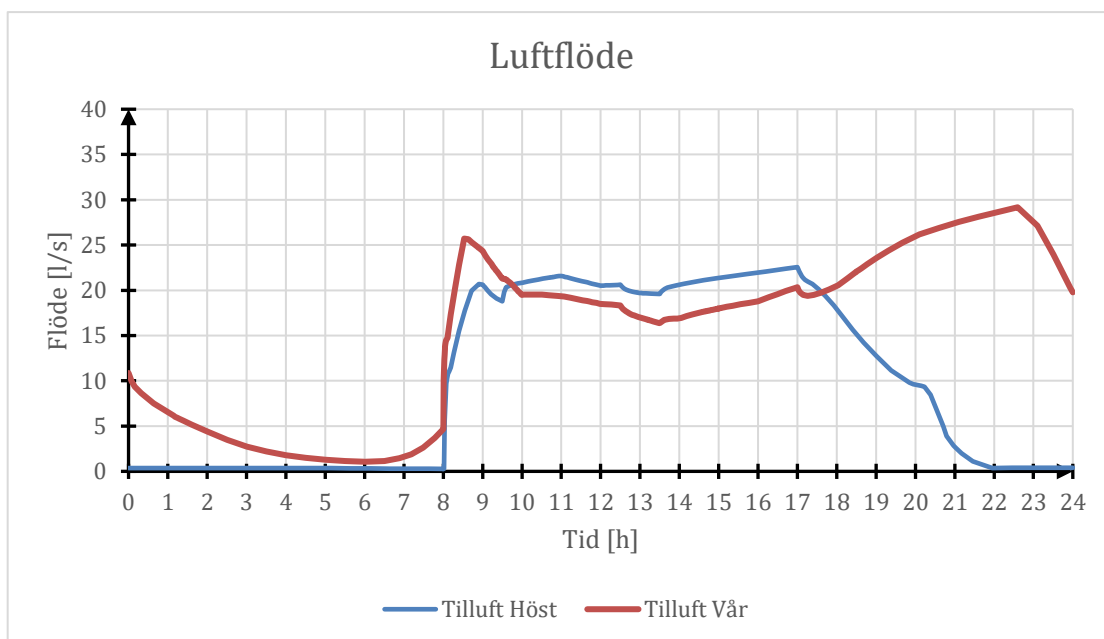
Den operativa temperaturen för respektive dygn finns i Figur 17. Medeltemperaturen för maximumdygnet var 29,1 °C under kontorstiden 08–17 vilket överskrider Folkhälsomyndighetens allmänna råd om inomhuslufttemperatur. Medeldygnet operativa medeltemperatur på 24,1 °C är inom de rekommenderade temperaturspannet.



Figur 17 visar den operativa temperaturen under medel- och maximumdygnet.

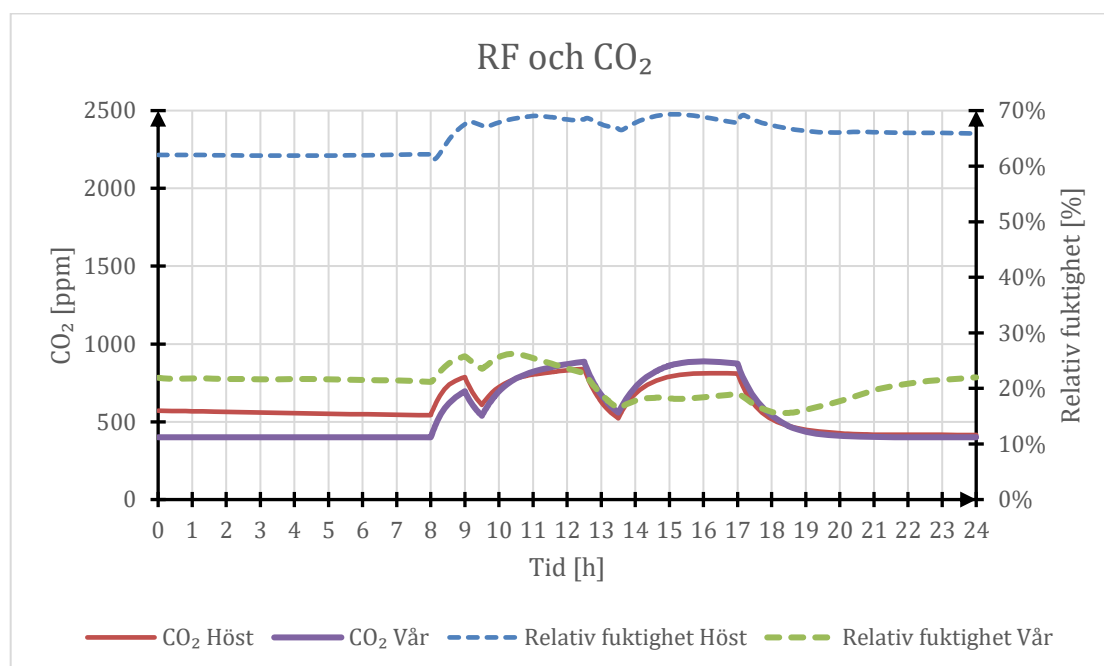
Vår och höst

Luftflödet på våren och hösten ligger runt det luftflöde som krävs på 20,2 l/s och visas i Figur 18. Medelvärdet för luftflödet under kontorstid på våren och hösten var 19,1 l/s och 20,4 l/s.



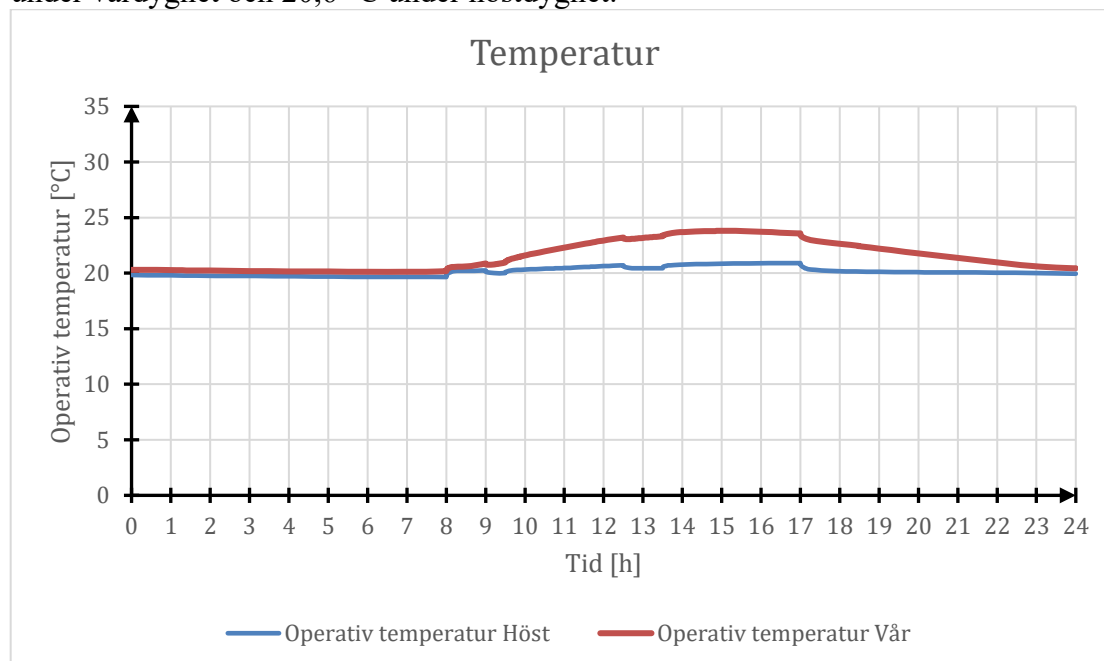
Figur 18 visar luftflödet under det dimensionerande höst- och vårdygnet.

Under både höst- och vårdygnet är CO₂-nivån klart under 1000 ppm enligt Figur 19. Den stora skillnaden finns i den relativa fuktigheten mellan höst och vår. Där vårdygnet har en låg relativ fuktighet med ett medelvärde på 21,5 % under kontorstid.



Figur 19 visar den relativa fuktigheten och CO₂-nivån under det dimensionerande höst- och vårdygnet.

Temperaturen för höst och vår som visas i Figur 20 har en jämn nivå på hösten och en mindre höjning på våren. Innetemperaturens medelvärde under kontorstid var 22,7 °C under vårdygnet och 20,6 °C under höstdygnet.



Figur 20 visar den operativa temperaturen under det dimensionerande höst- och vårdygnet.

4.3 Kulvert

Kontoret fick sin tilluft från en ventilationskulvert istället för fönstervädring i detta exempel. Kontoret har en öppning i golvet som släpper in tilluft och en kanal i taket som leder bort frånluft. Tidsramen för simuleringen är året 2021. Till skillnad från fönstervädringen så ger en längre simulering hur kulvertens temperatur påverkar jordens temperatur, vilket i sin tur ger ett mer realistiskt resultat jämfört med om enbart de dimensionerande dygnet väljs.

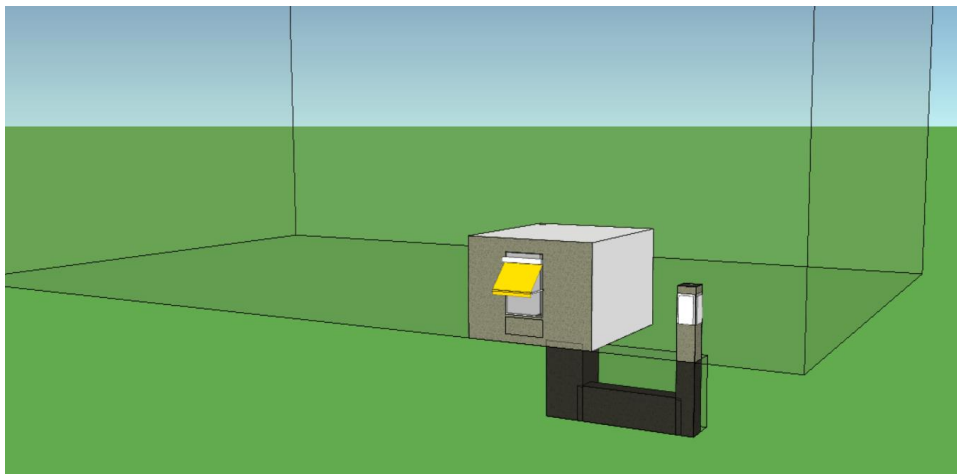
Utformningen av kulverten har gjorts med inspiration av kulverten i Vargbroskolan, där kulvertens mantelarea motsvarar ungefär 50 procent av skolans golv-area. Uppskattningen bygger på praktisk erfarenhet hos ingenjörskonsulter på ByDemand.

Konstruktion:

Mark-luft-värmeväxlaren består av tre delar, ett luftintag, en kanal och en kulvert under kontorsrummet. Utformningen av kulverten har gjorts i samarbete med ByDemand. Kulverten är utformad som en oisolerad källare i direkt anslutning till kontorets golv. Kontorsrummet har samma konstruktion som fönstervädringen. Väggarna och golvet i kulverten har U-värden som kan observeras i Tabell 6.

Tabell 6 – U-värden på konstruktionsdelar i kulvert samt kanal.

Konstruktionsdel	U-värde (W/m ² K)
Vägg	4,4
Golv	2,9



Figur 21 – kontoret och kulverten, den genomskinliga modellen är kontorshuset.

Luftintag

Luftintaget är placerat bredvid kontorsbyggnaden, med en kanal som går till kulverten. Luftintagets höjd är 1 m. Intaget har öppningar åt alla väderstreck, som är inställda på att öppnas och stängas vid bestämda vindhastigheter. Luftintaget har en kanal som sträcker sig 2 meter under markytan.



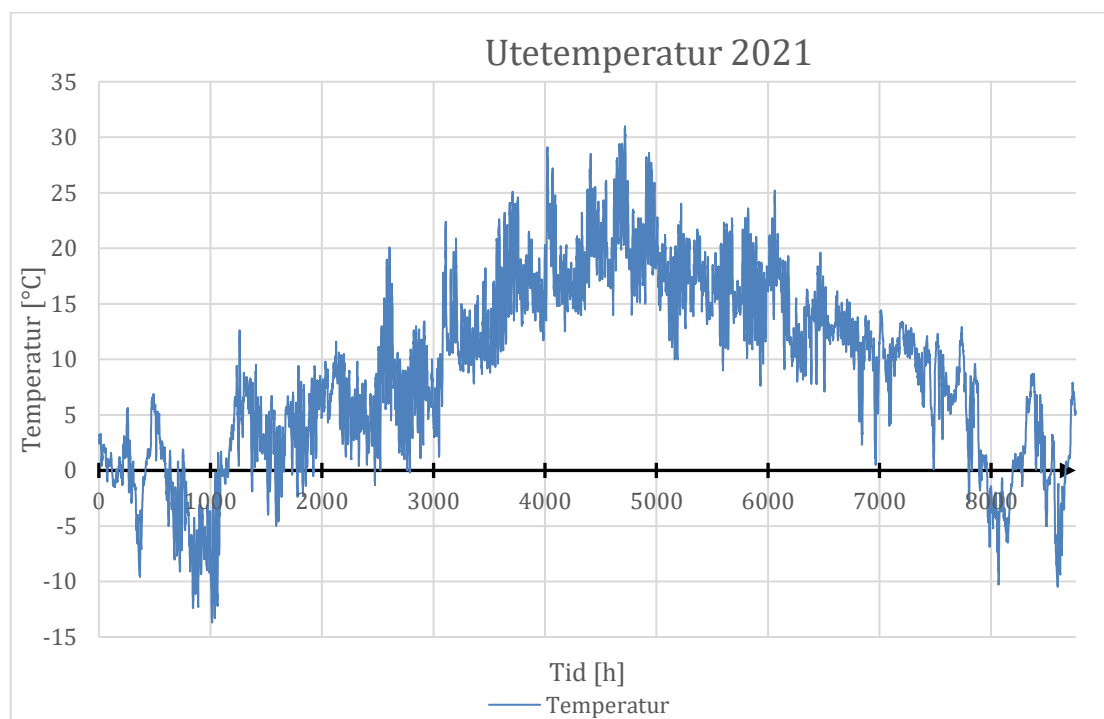
Figur 22 – ett exempel på luftintag för kulvertsystem i Göteborg.

Kanalen är nedgrävd 2 m i jorden, är direkt anslutet till luftintaget och är 2,8 m lång och 1 m hög.

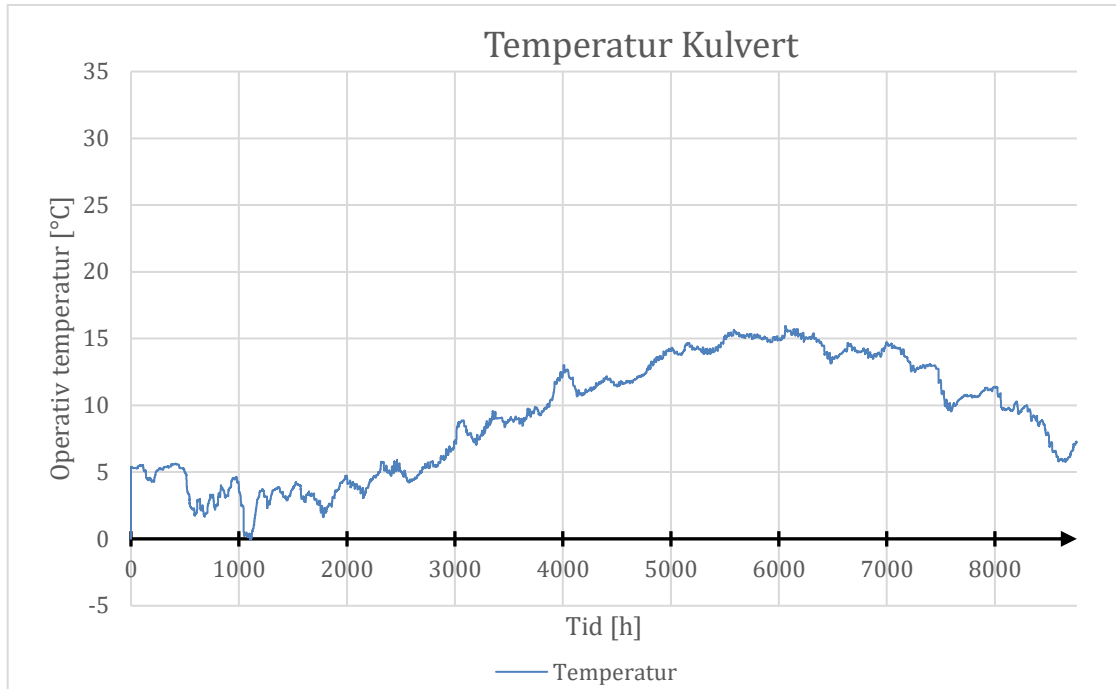
Kulverten är under kontoret, med 2 meters djup. Dess storlek och design är anpassat för att uppfylla kontorets behov.

Tilluften tillförs till kontoret via en lucka i golvet. Luckan är dimensionerad för ett kylande luftflöde på den varmaste dagen på sommaren med en strömningshastighet under 1,5 m/s. Den har överdimensionerats något med målet att undvika större tryckfall. Dimensionerna på luckan är 198x198 [mm]. Tilluftsluckan är styrd på att öppnas helt när temperaturen i kontoret överstiger 22°C med PI-reglering (proportionell-integralreglering).

Temperaturer

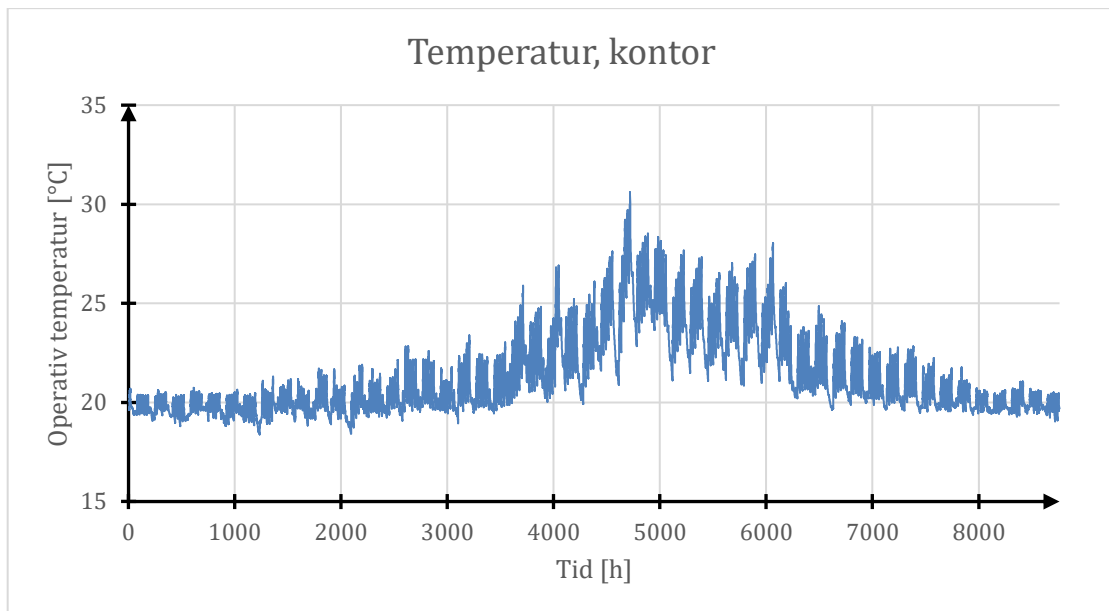


Figur 23 – utetemperatur 2021.



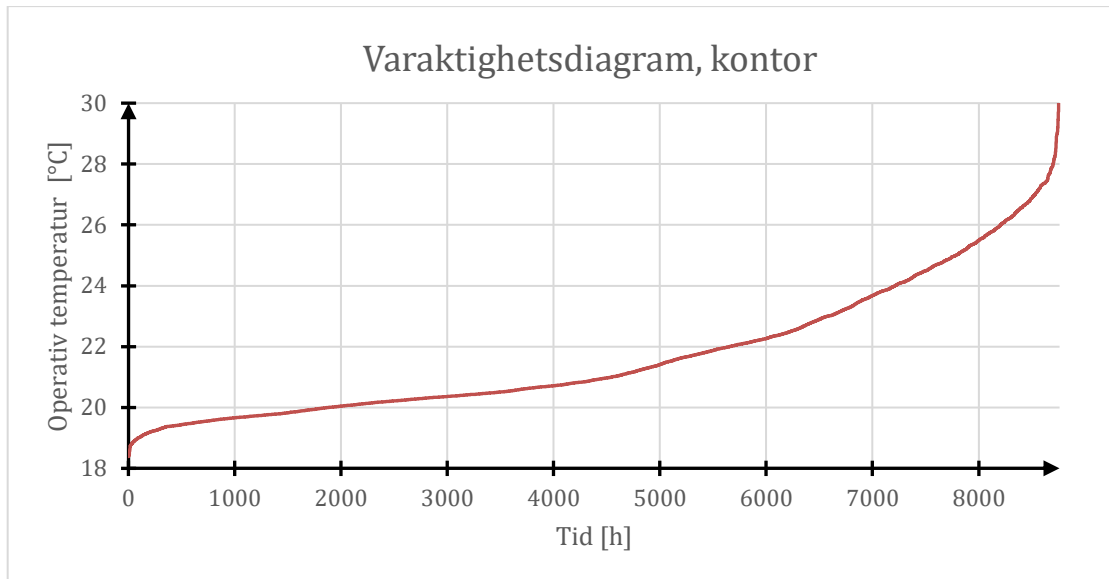
Figur 24 – lufttemperaturen i kulvert under 2021.

Genom att betrakta Figur 24 går det att se temperaturvariationen under året. Som lägst sjönk temperaturen i kulverten till 0 °C. Som varmast nådde kulverten temperaturen 15,9 °C. Utetemperaturen varierade i högre grad och är som lägst -13,7 °C, som högst 31,0 °C. Den operativa temperaturen inne på kontoret beskrivs av Figur 25.



Figur 25 – den operativa temperaturen i kontoret.

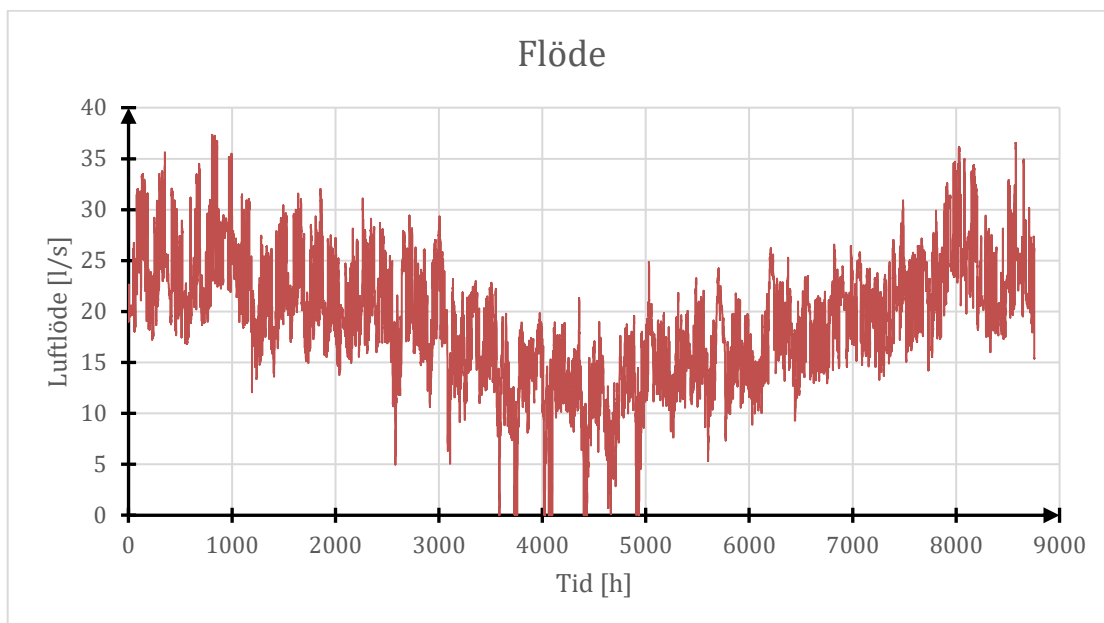
Temperaturen i kontoret varierade mellan som lägst 18,4 °C och som högst 30,6 °C.



Figur 26 - varaktighetsdiagram för operativ kontorstemperatur.

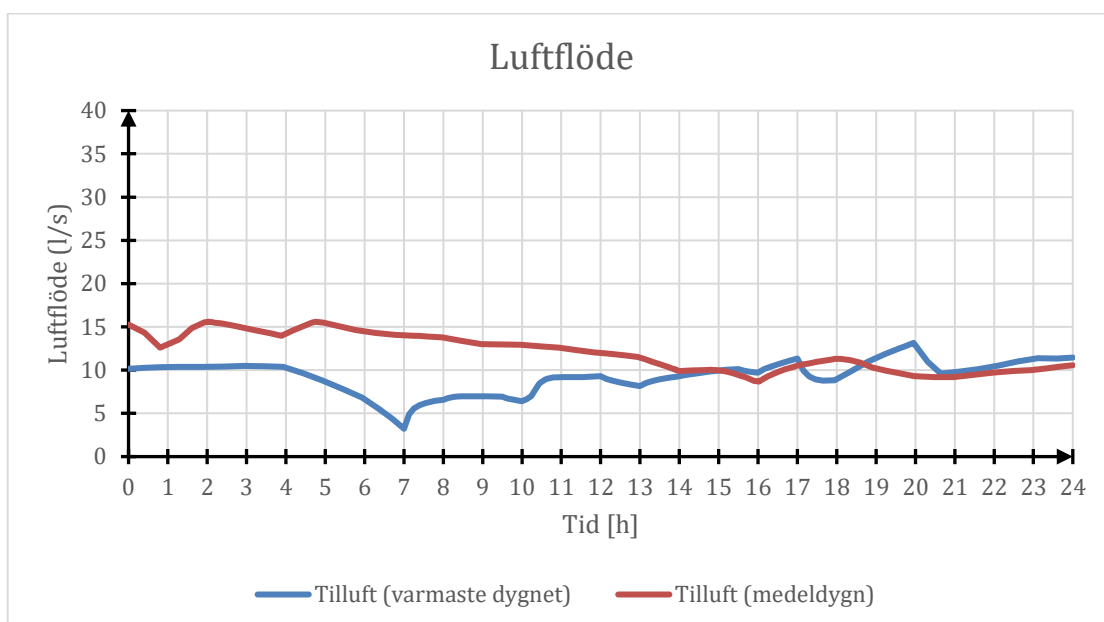
Figur 26 visar ett varaktighetsdiagram för innetemperatur i kontoret över året. Operativ temperatur låg mellan 18–26 °C i 8204 av årets totalt 8760 timmar.

Luftflöde



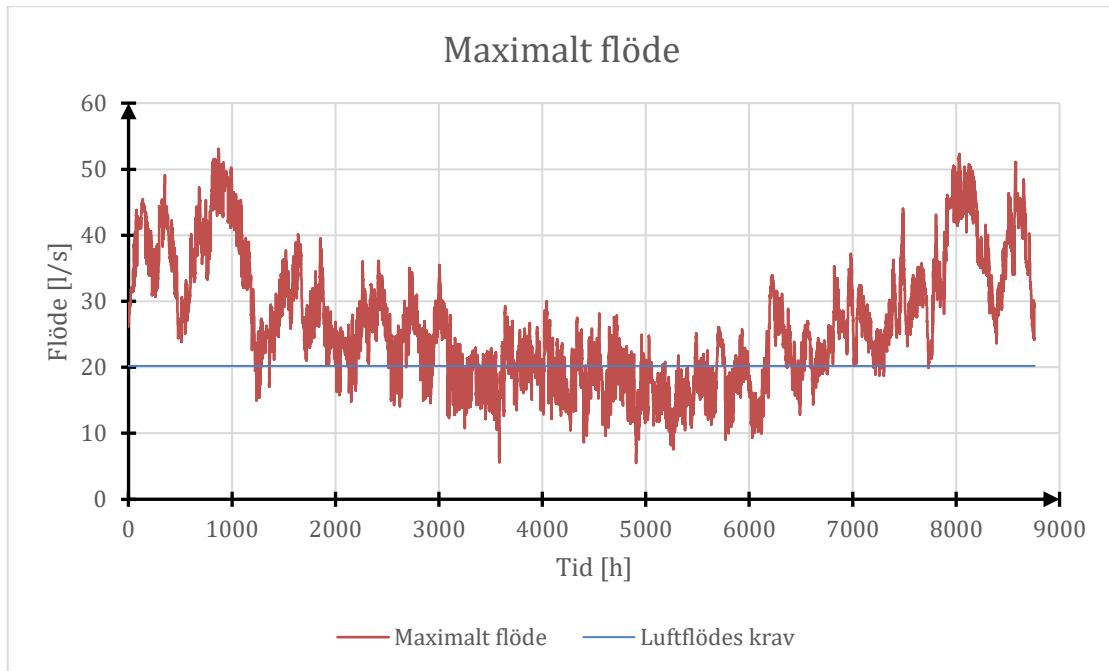
Figur 27 visar luftflödet i kontoret under året, temperaturstyrt.

Luftflödet från kulverten är som starkast i januari, och når som högst 37,3 l/s. Årets medelvärde är 19,5 l/s. Detta är med temperaturstyrd ventilation, det innebär att luftflödena ökar i takt med den interna värmelasten. Detta leder till lägre snittflöden över dygn då tilluften slutar flöda om det inte finns ett kylningsbehov.



Figur 28 visar luftflödet under sommarens max- och medeldygn.

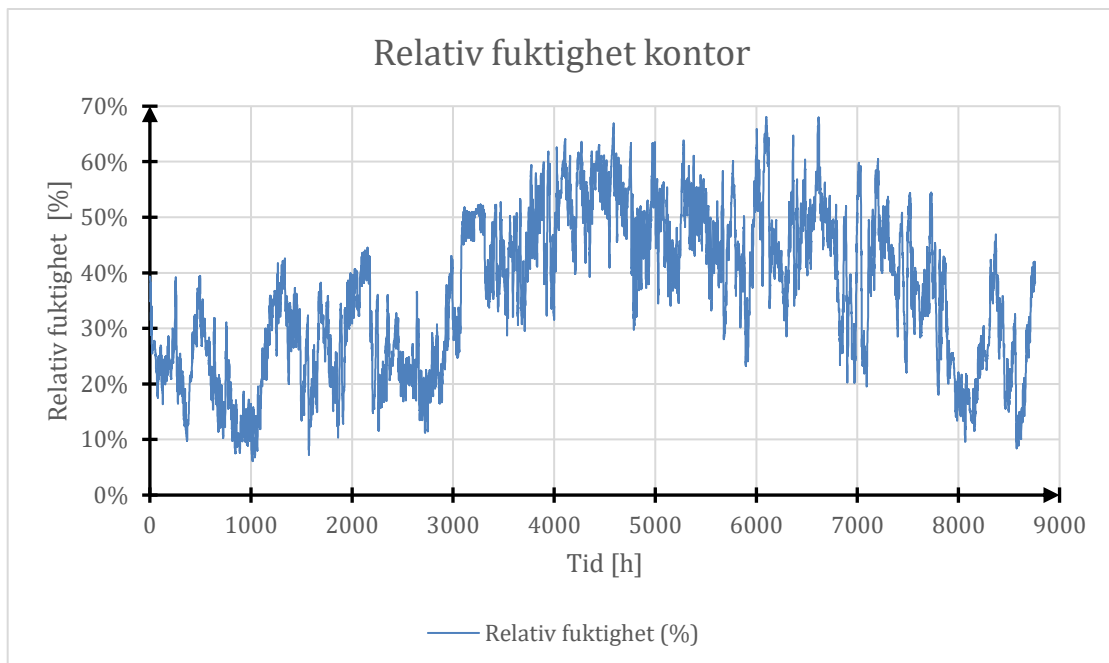
Under sommarens varmaste dygn varierar luftflödet från ventilationskulverten mellan som lägst 3,2 l/s till 13,1 l/s. Dygnets medelvärde är 8,8 l/s. Medeldygnnet har något högre flöden, framförallt på natten. Båda dygnen tillämpar nattkylning enligt principer i kapitel 3.1.4.



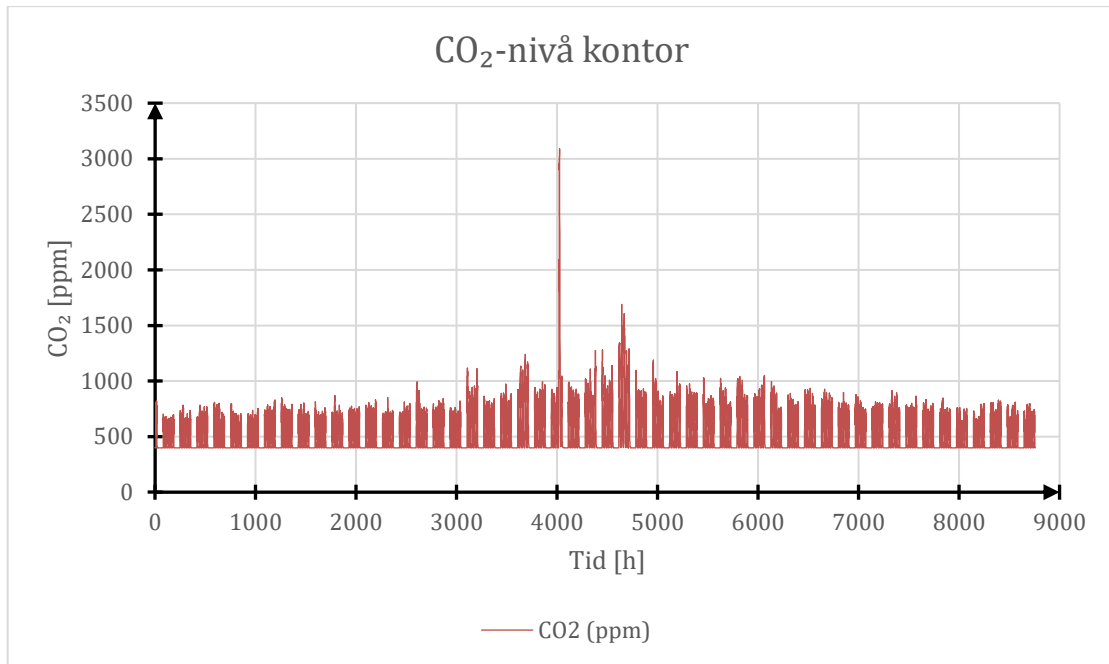
Figur 29 visar det maximala luftflödet under året 2021.

Av Figur 29 framgår att det maximala luftflödet klaras av vintern, hösten och delar av våren. Antalet timmar där luftflödeskravet på 20,2 l/s uppnås är 6164. Det motsvarar ungefär 257 dagar om året.

Relativ fuktighet och CO2



Figur 30 visar kontorsluftens relativa fuktighet



Figur 31 visar luftens koldioxid-halt under året

Den relativa fuktigheten i kontoret når som högst 68% och som lägst 6,1%. Årets medelvärde är 36%. Koldioxidhalten i kontoret är som högst 3090 ppm, som lägst 400 ppm (uteluftens koncentration). Koldioxidhalten under året är i snitt 558 ppm. Det går att utläsa från data i IDA ICE att koldioxidhalten når sin maxnivå när luftflödet i kontoret är ungefär 3,1 l/s.

5 Diskussion och slutsats

5.1 Diskussion fönsterventilation

Simuleringarna av fönstervädning visar på varierande resultat för de olika årstiderna och parametrarna. Under vintern var den genomsnittliga relativa fuktigheten beräknad till 23,9% vilket är under de optimala värden på 40-60% som Warfvinge och Dahlblom (2010) beskriver. En relativ fuktighet under 20% kan ge kroppsligt obehag som exempelvis torra slemhinnor. CO₂-nivån överskrider inte folkhälsomyndighetens rekommendationen av 1000 ppm (Folkhälsomyndigheten, 2024) och dess medelvärde ligger på 620.4 ppm under kontorstid. Det är viktigt att kontrollera uteluftens kvalitet, eftersom koncentrationen av föroreningar inomhus beror på uteluftens föroreningsnivå. Detta beskrivs närmare i kapitel 2.3.

Maxdygnet hade ett medelflöde på 11,2 l/s och ett minimiflöde på 2,2 l/s klockan 09:00. Detta visar att fönstervädningen har svårt att uppnå flödeskraven under årets varmaste dagar. Utetemperaturen under maximumdygnet pendlar mellan 26,7 °C och 30,9 °C under kontorstid vilket leder till att den termiska drivkraften blir låg och flödet detsamma. Likt Bang & Olufsens hybridsystem skulle luftflödet på maximumdygnet kunna förbättras genom användningen av en hjälpfläkt i frånluftskanalen för att förstärka den naturliga skorstenseffekten som beskrivs i kapitel 3.2.

Under medeldygnet på sommaren var medelluftflödet 21,4 l/s vilket motsvarar en luftomsättning på 1,5 h⁻¹. Detta kan jämföras med Siemens kontor i Dortmund som hade ett liknande ventilationssystem med ensidig fönstervädning. Det hade en typisk omsättning mellan 2-6 h⁻¹ under april, maj och juni och hade ett ventilationsbehov strax under 2 h⁻¹ (Pasquay, 2004). Omsättningen som uppnåddes kan även jämföras med Bang & Olufsens huvudkontor, kapitel 3.5.3, vilket hade ett mål på 1,5 h⁻¹.

CO₂-nivån under medeldygnet överstiger inte 1000ppm vilket tyder på att kontorsrummet ventileras tillräckligt ur ett hygieniskt perspektiv. Maxdygnets nivå ligger ungefär mellan 500-2500 ppm vilket är högre än de riktvärde på under 1000 ppm som finns men är långt ifrån en skadlig nivå.

Temperaturen under höst- och vårdygnet var stabil och kylningsbehovet kunde tillgodoses med tilluften. Luftflödet blev 19,2 l/s och 20,4 l/s, vår- respektive höstdygn. Vårens flöde var under gränsen som beräknades till 20,2 l/s enligt arbetsmiljöverkets regler.

Eftersom ånghalten i Figur 11 kan observeras att vara lägre under kallare månader, och den inte behandlas så kommer den relativa fuktigheten i kontoret vara låg med krävda luftflöden. Detta kan påverka den termiska komforten negativt. Koldioxidnivån låg under 1000 ppm under båda dyggen.

5.2 Diskussion kulvert

Kulvertssystemet klarar ej av kraven på operativ temperatur under en betydlig del av sommaren. I fallet med en skola blir detta ett inte lika problematiskt, på grund av sommarledigheten. Klimatets effekt på sommarhalvåret blir att den termiska drivkraften minskar, vilket minskar luftflödet. Kylningen av luften samt flödet blir begränsat, när det behövs mer kyleffekt. Det hade behövts en hjälpfläkt för de varmaste dagarna på sommaren. Det sker även övervädring på vintern på grund av den stora temperaturdifferensen inne i kontoret och i kulverten.

Det går att utläsa från Figur 26 att under 8204 timmar av året håller sig temperaturen i spannet 20–26 °C. De resterande ca 556 timmarna är under sommaren, främst i juli och augusti. Från Figur 25 (temperatur över året i kontor) går det att konstatera att temperaturen under stora delar av sommaren är över folkhälsomyndighetens allmänna råd om temperatur inomhus (HSLF-FS 2024:10).

Som högst når temperaturen i kulverten 15,9 °C, och på vinterhalvåret är den som lägst 0 °C. Detta skiljer sig avsevärt från kulverten i Vargbroskolan, vars temperatur beskrivs i kapitel 3.4.

Ett djupare nedgrävning av kanalen skulle ge en mer konstant temperatur för luftflödet in i kulverten. Att öka kanalens längd skulle ge en bättre kyleffekt på luften. Lufthastighet är svårt att kontrollera i ett naturligt system, men har en stor inverkan på mark-luft-värmeväxlarens effekt (Havtun & Törnqvist, 2013).

Den genomsnittliga relativa fuktigheten beräknades till 36% vilket är under de optimala värden på 40-60% som Warfvinge och Dahlblom (2010) beskriver. Detta hade kunnat åtgärdas genom fuktning av luften. På ett liknande sätt som i fönstervädningen så innebär den lägre absoluta fuktigheten i luften under kallare månader en låg relativ fuktighet inomhus.

Det erforderliga hygienluftsflödet för kontoret beräknades till 20,2 l/s. Vilket, enligt Figur 27, kulverten klarar av under stora delar av året. Flödet är som högst på vintern och hösten. Resultaten på Figur 28 visar flöde över hela dygnet, vilket inte ger oss en självklar bild av hur det ser ut under en arbetsdag. Det är enkelt att konstatera, från Figur 28, att kulverten inte levererar tillräckligt flöde under det varmaste sommardygnet eller under sommarens medeldygn. Eftersom kulverten styr sitt flöde utefter temperatur och bemanning så går det inte att summera antalet timmar då systemet underskrider kravet på 20,2 l/s. Från 17–08 är ventilationen reducerad på grund av styrstrategin. I Figur 29 är kulvertens tilluftskanal konstant öppen, vilket ger oss systemets maxkapacitet. Eftersom det är många timmar under sommaren där självdraget inte ger tillräckligt luftflöde bör systemet förstärkas med en hjälpfläkt.

Under kallare månader är temperaturen i kulverten högre än utetemperaturen. Under sommarmånader kyls luften ner. Det framgår även av Figur 24 att luften har mindre temperaturvariationer i ventilationskulverten. Vilket beror på att temperaturen i marken är mer stabil. Temperaturdifferensen under den kallaste tiden på året är 16,9 °C. Denna temperaturskillnad ger ett kraftigt minskat energibehov, till skillnad från att värma upp uteluften utan värmeväxlaren.

5.3 Begränsningar

Kulvert

Temperaturen i kulverten kan observeras aldrig överskrida 17 °C. Detta skiljer sig något från de uppmätta värdena i kulverten för Vargbroskolan, vars temperatur nådde cirka 20 °C under sommaren. En förklaring till temperaturskillnaden mellan uppmätta och simulerade värden kan vara att kontaktytan från kulverten till kontoret är mycket liten i beräkningsstudien. Detta medför att värmeläckaget från rummet är låga. Enligt Charlotta Berggren på ByDemand fanns vissa temperaturavvikelser även när de simulerade kulvert i IDA ICE.

Eftersom väder är varierande mellan år hade det behövts utföras simuleringar under flera år, för att kunna se hur ventilationskulvert med självdrag fungerar. 2021 var vindhastigheterna lägre än till exempel 2024. Det betyder att simuleringar under 2024 hade sannolikt gett något högre luftflöden.

För simuleringen som utfördes inför Vargbroskolan simulerades kulverten i två år för att inkludera den uppvärmningseffekt kulverten utgör på den kringliggande jorden enligt Charlotta Berggren, från ByDemand. Det vill säga att under hösten och vintern kommer marken runt kulverten ha en högre temperatur eftersom den varma luften under sommaren har värmt upp den. Detta leder till minskad risk för överventilering på vintern i tidigare simulering.

I vinterfallet blir luften i kulverten varmare, och därför kan det fås högre luftflöde med starkare värmeeffekt från luften. Utöver detta blir temperaturdifferensen mellan uteluft och tilluft i kulverten större, vilket leder till ett potentiellt högre flöde.

Fönstervädring

En begränsning i simuleringen är att beräkningar gjordes där lufttryckdifferensen på grund av temperaturdifferens är som högst, se Figur 2. Simuleringarna har genomförts med en konstant vindriktning på 160 grader vilket inte stämmer överens med verkligheten. Detsamma gäller vindhastigheten som sattes till 1,4 m/s under sommaren och övriga årstider 1,1 m/s. Vindhastigheterna är konservativt bestämda för att undersöka systemet i icke idealiska förhållanden.

Den klimatdata som användes i simuleringarna är tagen från ett år (2021) vilket kan leda till missvisande resultat. Tas det även hänsyn till klimatförändringarna kommer framtida väderförhållanden att vara alltmer osäkert och medföra varmare dagar och värmeböljor som kommer påverka kylbehovet ytterligare.

Beläggningen på kontoret är satt efter ett schema 8–17 med två pauser under hela året samt att de övriga interna lasterna är konstanta. I verkligheten kommer mer variation finnas.

5.4 Slutsats

Simuleringsresultaten visade att både fönsterventilation samt kulvertsystemet hade kapacitet nog för att klara av kraven för inneklimat, under gynnsamma förhållanden. Det fanns dock vissa perioder under sommarhalvåret då ventilationsflödet samt den operativa temperaturen inte uppfyllde kraven för ett gott termiskt klimat. Koldioxidnivåer höll sig på en bra nivå, men däremot var den relativa fuktigheten i båda simuleringar låg under långa perioder av året.

För de dagar då inneklimatet blev undermåligt krävs andra typer av åtgärden. I kulvertsystemet hade en enkel åtgärd varit att installera en hjälpfläkt för att öka flödet under de varmaste dagarna. Fönsterventilationens flöde hade kunnat förbättrats genom att beräkna med mindre konservativa vindvärden samt användning av korsventilation. En frånluftsfläkt för att förstärka luftflöden är också ett alternativ. För att hantera den ofta låga relativa fuktigheten hade det behövts fuktning av luften, eller att minska flödet under vinterhalvåret.

Slutsatsen från litteratur- och beräkningsstudien är att naturlig ventilation är tillämpbar i Sveriges klimat. Men för att uppfylla kraven som ställs på inneklimat i Sverige är det vanligt att tillämpa någon form av hybridssystem. Enbart självdrag uppnår kraven under långa perioder, men för att säkerställa ett system som fungerar även under de svåraste förhållandena kan det vara fördelaktigt att komplettera med mekaniskt stöd.

6 Referenser

- Abdolhamidi, S. (2018). *An ancient engineering feat that harnessed the wind*. BBC. Hämtad 2025-05-14 från <https://www.bbc.com/travel/article/20180926-an-ancient-engineering-feat-that-harnessed-the-wind>
- AFS 2023:12. *Arbetsmiljöverkets föreskrifter och allmänna råd om utformning av arbetsplatser*. <https://www.av.se/arbetsmiljoarbete-och-inspektioner/publikationer/foreskrifter/afs-202312/?o=n#5kap-klimatochinstallationerventilationtillforselavuteluft>
- AFS 2023:14. *Arbetsmiljöverkets föreskrifter och allmänna råd om gränsvärden för luftvägsexponering i arbetsmiljön*. <https://www.av.se/arbetsmiljoarbete-och-inspektioner/publikationer/foreskrifter/afs-202314/>
- Archnet. (2025). *Bayt al-Suhaymi*. <https://www.archnet.org/sites/2195>
- Artmann, N., Manz, H., & Heiselberg, P. (2007). Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe. *Applied Energy*, 84(2), 187-201. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.05.004>
- Bamdad, K., Matour, S., Izadyar, N., & Law, T. (2022). Introducing extended natural ventilation index for buildings under the present and future changing climates. *Building and Environment*, 226, 109688. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109688>
- Beiron, J. (2010). *Drifterfarenheter från en energieffektiv skola : Vargbroskolan i Storfors* ((ISSN)). (Arbetsrapport, Issue). <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kau:diva-5124>
- BFS 2011:6. *Boverkets byggregler (föreskrifter och allmänna råd)*. <https://rinfo.boverket.se/BFS2011-6/pdf/BFS2011-6.pdf>
- Boverket. (2024). *Om Boverkets byggregler, BBR*. Hämtad 2025-05-14 från <https://www.boverket.se/sv/byggande/regler-for-byggande/om-boverkets--byggregler-bbr/>
- Brohus, H., Christian, F., Per, H., & Hendriksen, O. J. (2003). Measurements of Hybrid Ventilation Performance in an Office Building. *International Journal of Ventilation*, 1(4), 77-88. 10.1080/14733315.2003.11683646
- Buonomo, B., Capasso, L., Diana, A., Manca, O., & Nardini, S. (2019). A numerical analysis on a solar chimney with an integrated latent heat thermal energy storage. *AIP Conference Proceedings*, 2191(1). 10.1063/1.5138762
- Chenari, B., Dias Carrilho, J., & Gameiro da Silva, M. (2016). Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1426-1447. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.074>
- Darkwa, J., Kokogiannakis, G., Magadzire, C. L., & Yuan, K. (2011). Theoretical and practical evaluation of an earth-tube (E-tube) ventilation system. *Energy and Buildings*, 43(2), 728-736. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.018>
- De Dear, R. J., & Brager, G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*,

- Duarte, R., Gomes, M., Rodrigues, A., & Pimentel, F. (2023). A Large-Diameter Earth–Air Heat Exchanger (EAHX) Built for Standalone Office Room Cooling: Monitoring Results for Hot and Dry Summer Conditions. *Applied Sciences*, 13, 12134. 10.3390/app132212134
- Eryener, D. (2020). Solar Chimneys: Technology and Their Role for Transition to 100% Renewable Energy. I (s. 529-550). https://doi.org/10.1007/978-3-030-40738-4_23
- Folkhälsomyndigheten. (2024). *Vägledning om ventilation*. Hämtad 2025-05-14 från <https://www.folkhalsomyndigheten.se/livsvillkor-levnadsvanor/miljohalsa-och-halsoskydd/halsoskydd/ventilation/>
- Fred the Oyster CC BY-SA 4.0. (2014). <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Malqaf.svg&oldid=1018930685>
- Göteborgs Stad. (2025). *Vad är en detaljplan?* Hämtad 2025-05-14 från <https://goteborg.se/wps/portal/start/goteborg-vaxer/sa-planeras-staden/detaljplanering/vad-ar-en-detaljplan>
- Göthberg, C., & Andersson, C. (2010). *Hybridventilation via markkulvert : en studie av tilluftstemperaturen* [Kandidatuppsats, Chalmers tekniska högskola]. Göteborg.
- Havtun, H., & Törnqvist, C. (2013). Reducing Ventilation Energy Demand by Using Air-to-Earth Heat Exchangers: Part 1 - Parametric Study. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 22, 717-729. 10.1007/978-3-642-36645-1_65
- HSLF-FS 2024:10. *Folkhälsomyndighetens allmänna råd om temperatur inomhus*. <https://www.folkhalsomyndigheten.se/publikationer-och-material/publikationsarkiv/f/folkhalsomyndighetens-allmanna-rad-hslf-fs-2024-10/>
- Jomehzadeh, F., Hussen, H. M., Calautit, J. K., Nejat, P., & Ferwati, M. S. (2020). Natural ventilation by windcatcher (Badgir): A review on the impacts of geometry, microclimate and macroclimate. *Energy and Buildings*, 226, 110396. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110396>
- Jomehzadeh, F., Nejat, P., Calautit, J. K., Yusof, M. B. M., Zaki, S. A., Hughes, B. R., & Yazid, M. N. A. W. M. (2017). A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 736-756. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.254>
- Junghans, L., & Widerin, P. (2017). Thermal comfort and indoor air quality of the “Concept 22/26”, a new high performance building standard. *Energy and Buildings*, 149, 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.020>
- Naturvårdsverket. (2025). *Utsläpp i siffror*. Hämtad 2025-05-19 från <https://utslappisiffror.naturvardsverket.se/sv/Amnen/Vaxthusgaser/Koldioxid>
- Oropeza-Perez, I., & Østergaard, P. A. (2014). Potential of natural ventilation in temperate countries – A case study of Denmark. *Applied Energy*, 114, 520-530. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.008>
- Pasquay, T. (2004). Natural ventilation in high-rise buildings with double facades, saving or waste of energy. *Energy and Buildings*, 36(4), 381-389. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.018>

- Petersson, B.-Å. (2018). *Tillämpad byggnadsfysik* (Sjätte upplagan uppl.). Lund : Studentlitteratur.
- Sangdeh, P. K., & Nasrollahi, N. (2022). Windcatchers and their applications in contemporary architecture. *Energy and Built Environment*, 3(1), 56-72. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.10.005>
- Severinson, H. (2015). *Byggvägledning. en handbok i anslutning till Boverkets byggregler (BBR) 7 Ventilation* (Femte uppl.). AB Svensk Byggtjänst. SFS 1994:847. *Lag om tekniska egenskapskrav på byggnadsverk, m.m.* <https://www.riksdagen.se/sv/dokument-och-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/lag-1994847-om-tekniska-egenskapskrav-pa-sfs-1994-847/>
- SMHI. (2021). *Ladda ner meteorologiska observationer*. Hämtad 2025-05-26 från <https://www.smhi.se/data/hitta-data-for-en-plats/ladda-ner-vaderobservationer/airtemperatureMean24h/71420>
- Terpiger Andersen, K., Heiselberg, P., & Aggerholm, S. (2002). *Naturlig ventilation i erhvervsbyggnader*. By og Byg, Statens Byggeforskningsinstitut.
- The British Standards Institution. (1991). *Ventilation principles and designing for natural ventilation (BS 5925:1991)*. I: The British Standards Institution.
- Warfvinge, C., & Dahlblom, M. (2010). *Projektering av VVS-installationer* (1:19, Red.). Studentlitteratur AB.
- Yao, R., Li, B., Steemers, K., & Short, A. (2009). Assessing the natural ventilation cooling potential of office buildings in different climate zones in China. *Renewable Energy*, 34(12), 2697-2705. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.015>

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH
SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2025
www.chalmers.se



CHALMERS