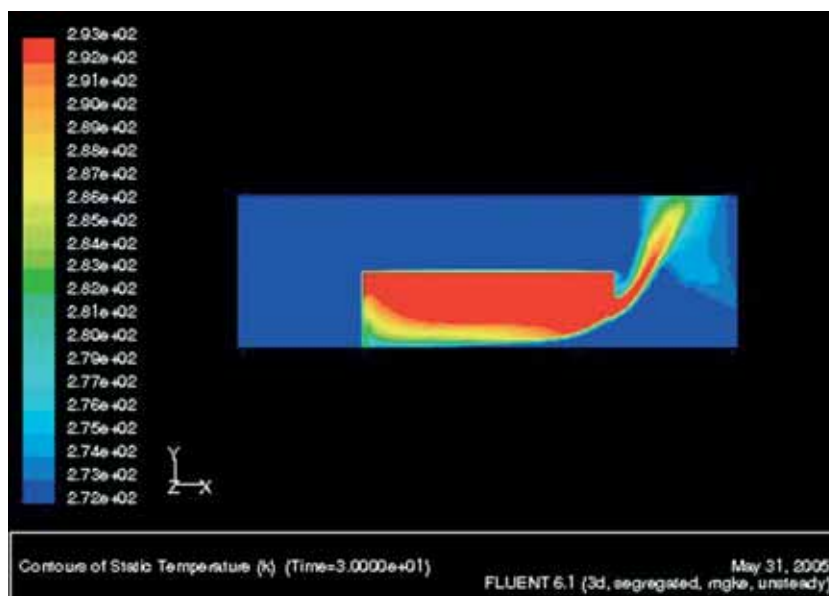


# Utvärdering av industriportar –bedömning av energiförluster och luftridåers funktion



**SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut** utvecklar och förmedlar teknik för näringslivets utveckling och konkurrenskraft och för säkerhet, resurshushållning och god miljö i samhället. Vi har Sveriges bredaste och mest kvalificerade resurser för teknisk utvärdering, mätteknik, forskning och utveckling. Vår forskning sker i nära samverkan med högskola, universitet och internationella kolleger. Vi är drygt 750 medarbetare som bygger våra tjänster på kompetens, effektivitet, opartiskhet och internationell acceptans.



SP Energiteknik  
 SP RAPPORT 2005:08  
 ISBN 91-85303-39-9  
 ISSN 0284-5172



**SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut**

Box 857  
 501 15 BORÅS  
 Telefon: 033-16 50 00, Telefax: 033-13 55 02  
 E-post: [info@sp.se](mailto:info@sp.se), Internet: [www.sp.se](http://www.sp.se)

*A Member of*

 **United Competence**

Tobias Törnström, Henrik Quicklund, Monica Axell

# Utvärdering av industriportar –bedömning av energiförluster och luftridåers funktion

## **Abstract**

### **Investigation of industrial gateways - evaluation of energy losses and the function of air curtains**

The need for reducing the energy usage and in particular the electricity-usage is increasing. Every year lot of energy is wasted when using industrial gates. It is therefore important to examine this energy loss and to evaluate solutions for preventing or reducing this occurrence. In order to design good solutions that provide the desired climate in the premise and at the same time save energy we need knowledge on how a certain parameter affects the leakage of the surrounding air into the building.

The purpose of this project was to examine the energy losses that arise when using industrial gates and to evaluate solutions to reduce these losses. Numerical calculations have been applied to evaluate the following parameters effect on the air exchange through the opening; temperature difference between the building and the surrounding, the size of the gate and the size of the building. For examine the function of the air curtain the inlet velocity, the width and the inlet turbulence intensity were evaluated. The CFD calculations have been complemented with the energy simulation program Simulink and also compared with measurements from previous studies.

The results show a good agreement between the CFD and the Simulink calculation after the adjustment of a coefficient in Simulink. The size of the building did not affect the energy exchange through the gate. For each gate size there is an optimal inlet velocity and width of the air curtain that results in lowest energy exchange through the gate. When dimensioning the air curtains the impulse force of the air curtain should be used since it combines the velocity and width. It was also concluded that of two air curtains with the same impulse force the wider curtain is the most efficient. With a correct installed and dimensioned air curtain it is possible to achieve an energy saving of approximately 60-85 percent.

Key words: gateway, air curtain, air exchange, energy loss, CFD, Simulink

**SP Sveriges Provnings- och  
Forskningsinstitut**  
SP Rapport 2005:08  
ISBN 91-85303-39-9  
ISSN 0284-5172  
Borås 2005

**SP Swedish National Testing and  
Research Institute**  
SP Report 2005:08

Postal address:  
Box 857,  
SE-501 15 BORÅS, Sweden  
Telephone: +46 33 16 50 00  
Telex: 36252 Testing S  
Telefax: +46 33 13 55 02  
E-mail: info@sp.se

# Innehållsförteckning

<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>Innehållsförteckning</b>	<b>3</b>
<b>Förord</b>	<b>4</b>
<b>Sammanfattning</b>	<b>5</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>6</b>
1.1 Tidigare studier	6
1.2 Syfte	7
1.3 Genomförande av projektet	7
<b>2 Teori</b>	<b>9</b>
2.1 Luftflöden genom vertikala öppningar	10
2.2 Luftridåer	11
<b>3 Numeriska simuleringar</b>	<b>13</b>
3.1 CFD beräkningar	13
3.2 Simulink beräkningar	15
<b>4 Beräkningsfall</b>	<b>17</b>
4.1 Port utan luftridå	17
4.2 Port med luftridå	18
<b>5 Resultat</b>	<b>20</b>
5.1 Port utan luftridå	21
5.2 Port med luftridå	25
5.3 Utvärdering luftridå	30
<b>6 Diskussion</b>	<b>32</b>
<b>7 Slutsatser</b>	<b>34</b>
<b>8 Framtida arbete</b>	<b>35</b>
<b>9 Referenser</b>	<b>36</b>
Bilaga 1. Randvillkor och resultat för beräkningsfallen utan luftridå	38
Bilaga 2. Randvillkor och resultat för beräkningsfallen med luftridå	39

## Förord

Detta projekt har initierats för att kartlägga energiförluster som genereras vid användandet av industriportar och för att utvärdera hur en luftrida kan förhindra eller minska dessa förluster. Genom numeriska beräkningar har energiförlusterna genom industriportar kunnat undersökas. För verifiering av beräkningarna har tidigare utförda mätningar använts tillsammans med ett ytterligare simuleringsprogram. Numeriska beräkningar har även genomförts för att undersöka luftridåers förmåga att hindra den kallare omgivningsluftens från att tränga in i byggnaden.

Projektet har bedrivits i samarbete med företaget Frico AB som bland annat arbetar med försäljning och utveckling av luftridåer. Genom detta samarbete har projektet fått tillgång till relevanta indata avseende olika parametrar för luftridåerna men även annan praktisk information som varit givande för projektet. Samarbetet med företag inom luftridåbranschen kommer att fortsätta för att ytterligare kunna optimera luftridåerna och deras funktion och då medverka till att sänka energianvändningen vid industriportar och andra typer av öppningar.

Projektledare har Tekn. Lic. Tobias Törnström varit. Han har bland annat ansvarat för CFD beräkningarna. Henrik Quicklund har stått för beräkningarna med Simulink samt deltagit i insamling och verifiering av beräkningsdata. Monica Axell har varit med i planeringen av projektets upplägg samt bidragit med kunskap angående vilka parametrar som är väsentliga att undersöka. Råd och synpunkter har inhämtats från Svein Ruud på SP Energiteknik avseende bland annat beräkning av energiförluster i lokalen.

Projektet har finansierats till 100 % av Statens Energimyndighet.

## Sammanfattning

Behovet att minska energianvändningen och då särskilt el-användandet ökar. Varje år går stora mängder energi förlorad vid användandet av oskyddade industriportar. Det är därför viktigt att kartlägga dessa förluster som uppstår samt utvärdera lösningar för att förhindra att dessa uppstår. För att utforma bra lösningar som både ger ett önskvärt klimat i lokalen samtidigt som energi sparas behöver vi ha kunskap om hur en viss parameter påverkar läckaget av omgivningsluften in i byggnaden.

Syftet med projektet var att undersöka vilka energiförluster som uppstår vid användandet av industriportar samt att utvärdera lösningar för att minska dessa förluster. Genom numerisk modellering av luftflödena genom portöppningen har inverkan av olika parametrar utvärderats. De parametrar som har undersökts är följande: temperaturdifferensen mellan byggnaden och omgivningen, portens storlek och förhållandet mellan höjd och bredd, byggnadens storlek. För att undersöka funktionen hos luftridån har dess inloppshastighet, bredd och turbulensintensitet vid inloppet utvärderats. CFD beräkningar har tillämpats som den huvudsakliga metoden men även beräkningar med Simulink har använts som verifiering. Dessutom har mätningar från tidigare genomförda studier använts som verifiering av de numeriska beräkningarna.

Resultaten visar vid en första jämförelsen mellan CFD och den ursprungliga modellen i Simulink på relativt stora skillnader avseende luftutbytet genom porten. Genom att korrigera öppningskoefficienten i Simulink erhöles en bra överensstämmelse mellan dessa två olika metoder. Vidare visade resultaten att byggnadens storlek inte påverkar storleken på energiförlusten genom porten. För en oskyddad port minskade energiutbytet genom porten med en vindlast på 5 m/s.

För varje portstorlek finns det en optimal inloppshastighet och bredd på luftridån som ger minsta möjliga energiförluster genom öppningen. Impulskraften är den parameter som bör användas vid dimensioneringen av luftridån eftersom att det är kombinationen mellan bredden och hastigheten som avgör vilken hastighet som är luftridåns optimala. För två luftridåer med samma impulskraft men med olika förhållande mellan bredd och inloppshastighet är den breda luftridån effektivare. Med en korrekt installerad och dimensionerad luftridå kan man göra energibesparingar på 60-85 procent.

# 1 Inledning

Behovet av att reducera energianvändningen och minska användandet av elenergi i industrilokaler ökar. Detta gäller särskilt i länder med kallt klimat som Sverige där uppvärmningsbehovet är stort. Ventilations- och uppvärmningssystemet används för att kontrollera kvaliteten på inomhusluften och den termiska komforten i industrilokalen. Det är därför av största vikt att använda lämpliga system både energimässigt men även för att garantera ett gott inomhusklimat för personerna i lokalen. En faktor som både påverkar energianvändningen och klimatet i lokalen är användandet av stora portar. Dessa används dagligen och kan ge upphov till stora okontrollerade energiförluster men även ett försämrat termiskt klimat i lokalen. Det är därför viktigt att använda lämpliga lösningar för att förhindra eller minimera dessa energiförluster. För att utforma bra lösningar som både ger ett önskvärt klimat i lokalen samtidigt som energi sparas behöver vi ha kunskap om hur en viss parameter påverkar läckaget in i byggnaden. Dels behöver vi veta hur stor besparing som kan åstadkommas på energianvändningen men även hur olika parametrar påverkar karakteristiken och storleken på luftflödet in i industrilokalen.

Under vintern, när det är en stor temperaturskillnad mellan lokalen och omgivningen, kan användandet av oskyddade portar leda till att stora mängder av kall luft tränger in i byggnaden. Detta kan leda till att kraftigt försämra det termiska inomhusklimatet men också till ett ökat energianvändande. Det ökade energianvändandet beror på att luften i lokalen har sjunkit och värmeenergi måste tillföras för att uppnå ett bra termiskt klimat. Extra stor påverkan uppstår naturligt från de portar genom vilka mycket trafik och gods passerar varje dag. Trots att portarna i sig själva har blivit mer effektiva under senare år, dels genom en tekniktävling som anordnades av Statens Energimyndighet, både ur energisynpunkt, bättre isolerade, men även mer snabbstängande kvarstår problemet då dessa portar måste öppnas vid passage. Ett sätt att skydda öppningarna då dessa är oskyddade kan vara att installera en luftridå för att förhindra att kall utomhusluft tränger in i lokalen. Syftet med luftridån är att upprätthålla ett bra inomhusklimat i byggnaden samtidigt som energianvändningen kan reduceras.

Även det omvända scenariot, det vill säga då det är varmare utomhus är inomhus, inträffar för industrilokaler men i en relativt lite omfattning för lokaler i Sverige. Därför har vi fokuserat på fallet då utomhustemperaturer är lägre än temperaturen i lokalen. Tillämpningen av en luftridå kan vara stort även för dessa förhållanden men främst för andra typer av lokaler. I exempelvis livsmedelsaffärer används luftridåer för att skapa olika temperaturzoner för att skydda varorna och hålla dessa vid lämpliga temperaturer.

## 1.1 Tidigare studier

Både experimentella och numeriska studier har genomförts på luftväxling genom stora öppningar. Nielsen och Olsen (1993) har utfört fullskaliga mätningar med spårgas. Syftet med mätningarna som Hejazi-Hashemi och Sirén (1997) genomförde på tolv industrilokaler var att utveckla riktlinjer och designverktyg för att minska mängden okontrollerad utomhusluft från att tränga in i byggnaden. Wilson och Kiel (1990) utförde mätningar av luftflödet genom en dörröppning med en temperaturskillnad upp till 45°C. Ett antal numeriska studier har genomförts på luftväxling genom stora öppningar. Schaelin med flera (1992) använde CFD för att beräkna luftflödet genom stora öppningar. Li och Teh (1996) undersökte luftflödet genom ett fönster i ett ventilerat rum. Tang (1998) studerade luftflödet genom två angränsande utrymmen med olika temperatur med CFD.

Studier med fokus på luftridåer och dess funktion har bland annat genomförts av Hayes och Stoecker (1969a, b), Hetsroni med flera (1963, 1964), Howell med flera (1976, 1980), Van Nguyen (1983). I dessa undersökningar har fullskaliga experiment utförts på



luftridåer monterade över öppningar till slutna uppvärmda kammare. Syftet med dessa experiment har bland annat varit att undersöka hur parametrar som luftridåns bredd, inloppshastighet, inloppsvinkel och turbulensintensitet påverkar funktionen hos luftridån. Dessutom har mätningarna använts för att ta fram tillförlitliga modeller för att bestämma värmeutbytet genom ridån.

## 1.2 Syfte

Projektets huvudsyfte var att undersöka vilka energiförluster som uppstår vid användandet av industriportar samt att utvärdera lösningar för att minska dessa förluster. Genom numerisk modellering av luftflödena genom portöppningen har inverkan av olika parametrar utvärderats. De parametrar som har undersökts är följande: temperaturdifferensen mellan byggnaden och omgivningen, portens storlek och förhållandet mellan höjd och bredd, byggnadens storlek. Ett av anledningarna till att ta fram dessa resultat är att dessa ska kunna användas som indata i olika energisimuleringsprogram. Luftridåernas funktion och deras energibesparingspotential har också undersökts. De variabler hos luftridån som har utvärderats är bredden, turbulensintensiteten vid inloppet hos luftridån samt dess inloppshastighet. Dessutom har vindens påverkan undersökts både på den oskyddade porten och för porten utrustad med en luftridå.

## 1.3 Genomförande av projektet

Eftersom att det är svårt att generera väldefinierade och stabila förhållanden i industri-lokaler och utanför öppningen är det mycket komplicerat att på ett kontrollerat sätt kunna mäta de luftflöden och det energiutbyte som uppstår genom stora vertikala öppningar i industri-lokaler. Fluktuationer och instabiliteter som förekommer, främst utomhus men även till viss del inomhus beror på olika faktorer. Den huvudsakliga orsaken är de variationer som uppstår på grund av vindens variationer och instabila egenskaper. Dessutom kan temperatursvängningar förekomma både utomhus och inne i lokalerna. Därför för att minimera effekten från dessa ”störningar” kan man behöva tillämpa andra metoder. För att utvärdera de luftströmmar som uppstår genom en öppen port kan därför Computational Fluid Dynamics (CFD) vara en lämplig metod att använda. CFD är en metod, där man kan modellera hur gaser och vätskor uppträder i olika geometrier med eller utan värmeöverföring. CFD är en så kallad helfältsmetod som genererar lösningar av de sökta variablerna över en hel yta eller volym. En fördel med CFD är att man får fram information om flera variabler (hastighet, temperatur, koncentrationsfördelningar med mera) vid en beräkning. Vidare kan man enkelt skapa liknande och stabila förhållanden som inte påverkar resultatet för de olika fallen.

Arbetet med att undersöka energiförlusterna genom industriportar och luftridåers förmåga att minska luftutbytet genom porten har därför undersökts med hjälp av numeriska beräkningar. Den huvudsakliga utvärderingen har utförts med CFD. Men eftersom CFD inte är en exakt metod, utan man tillämpar olika modeller för att simulera strömningen, måste dessa resultat verifieras. Därför har simuleringar även genomförts med Simulink. Dessutom har jämförelse, avseende luftutbytet genom porten, även gjorts med mätningar från andra studier.

Arbetet i projektet kan delas upp i följande steg:

- Litteraturnomgång gjordes på tidigare studier på luftutbyte genom stora vertikala öppningar samt studier på luftridåer. Detta genomfördes för att kartlägga vilka parametrar som styr funktionen hos luftridån, men även för att erhålla mätningresultat som kunde användas för jämförelse med simuleringarna.
- Numeriska beräkningar med CFD och Simulink samt jämförelse med tidigare genomförda mätningar på luftutbyte genom vertikala öppningar genomfördes.

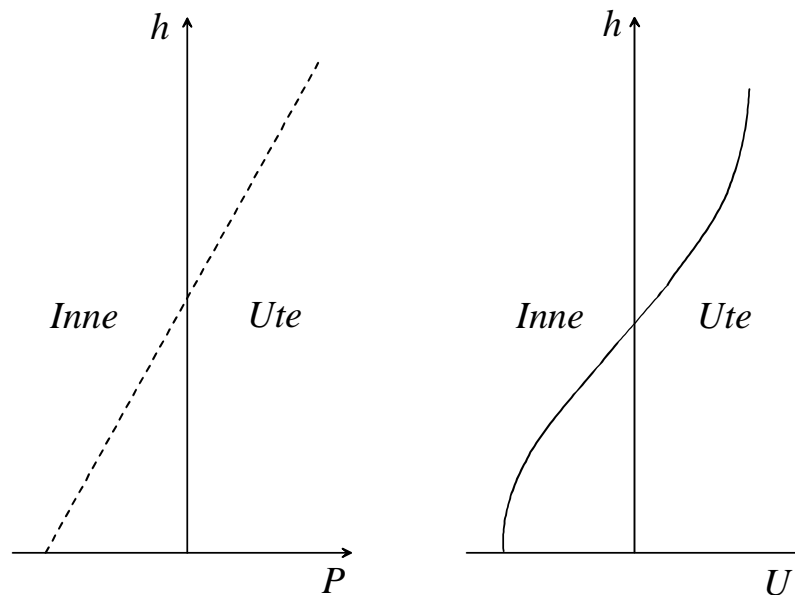
Detta moment utfördes främst för att verifiera CFD beräkningarna så att dessa sedan kunde användas för den fortsatta utvärderingen av luftridåernas funktion.

- Utvärdering av energiförlusterna genomfördes för en oskyddad port avseende flera olika parametrar med hjälp av CFD beräkningar. Här genomfördes en parameterstudie för att kartlägga energiförlusterna genom porten utan luftridå.
- Utvärderingar av luftridåernas funktion utfördes med hjälp av numeriska beräkningar med CFD. Här genomfördes en parameterstudie av de parametrar som styr funktionen hos en luftridå. Detta utfördes för olika portstorlekar och olika omgivningstemperaturer.
- Slutligen genomfördes en utvärdering av luftridåns besparingspotential. Detta gjordes på årsbasis för att utvärdera energibesparingspotentialen hos luftridåerna. Denna utvärdering undersöktes vid två olika årsmedeltemperaturer som täcker in Sveriges lägsta och högsta medeltemperaturer.

## 2 Teori

De flesta byggnaderna har avsiktligt tillverkade öppningar, som till exempel dörrar, fönster, ventilationsöppningar med mera, men även öppningar som oavsiktligt tillkommit vid byggandet eller användandet av byggnaden. Luftläckage kan uppstå genom samtliga typer av öppningar, med varierande effekt, men leder i samtliga fall till ett nettoutbyte mellan luften inne i bygganden och utanför. Detta luftläckage kan få både positiv effekt; möjliggör naturlig ventilation i byggnaden, men även negativ effekt genom att öka värmeförlusterna och energianvändningen under uppvärmningssäsongen. I denna undersökning har vi fokuserat på det luftutbyte som sker under vintern, genom stora vertikala öppningar, då kall luft tränger in i lokalerna.

På grund av temperaturskillnaden mellan byggnaden och omgivningen uppstår en differens mellan densiteten på luften inne i byggnaden och omgivningen. Denna densitetsskillnad ger i sin tur upphov till en tryckskillnad över porten, se Figur 1. Denna tryckskillnad får då en linjär lutning där ett undertryck bildas på den undre delen av öppningen och ett övertryck i den övre delen. Detta kommer i sin tur generera ett luftutbyte genom porten med en ungefärlig hastighetsfördelning enligt den högra figuren. På så sätt kommer den kallare omgivningsluften att bilda en täthetsström som flyter in längs golvet till den når den borte väggen i byggnaden. I den övre delen av öppningen kommer den varma inomhusluften då pressas ut och bilda en plymliknande strömning.



Figur 1. Tryckuppsättning över porten och resulterande hastighetsprofil

Industrilokaler har ofta stora vertikala öppningar för hantering och transport av in- och utgående gods. Dessa öppningar är i regel utrustade med en port för att förhindra att den kalla utomhusluften ska komma in i byggnaden. När dessa portar är öppna kommer en stor mängd kall luft att tränga in i byggnaden. Under vintersäsongen leder detta till stora energiförluster samt försämrat termiskt klimat för de anställda. Därför, som ett extra skydd vid porten, kan en installation av en luftrida vara lämplig.

Luftflödet genom en öppning i byggnadens fasad kan bero på följande faktorer, enligt Goodfellow och Tähti (2001):

- Storleken och fördelningen på läck-passagerna
- Strömningens karaktäristik genom läck-passagerna

- Tryckskillnaden över läck-passagerna

Luftflödet genom öppningarna baseras på massbalansen över hela byggnadens omslutande ytor. Storleken på dessa flöden beror in sin tur på tryckskillnaden över fasaden som kan orsakas av både vinden och temperaturskillnader mellan lokalen och omgivningen. Även obalans i ventilationssystemet kan ge upphov till oönskad luftväxling. Enligt Allard and Utsumi (1992), orsakas dessa luftflöden av olika faktorer. Dessa faktorer kan delas in i två huvudkategorier; de som bildas av stationära effekter (medelflödet), och de som beror på fluktuationer som varierar över tiden. Den första gruppen inkluderar vinden och dess medelkaraktär, gravitationseffekter på grund av densitetsvariationer och påverkan från ventilations- och uppvärmningssystemet. Den andra gruppen består av fluktuerande luftflöden som uppkommer av fluktuerande tryckskillnader.

## 2.1 Luftflöden genom vertikala öppningar

Enligt Wilson och Kiel (1990) kan luftutbytet genom en öppning idealiseras som ett par icke-viskösa flöden som drivs av en tryckkraft som i sin tur beror på densitetsskillnader mellan olika luftmassor. För att ta hand om de förluster som uppstår; kontraktion i strömningen, kinetiska energiförluster och korsströmsförluster har en öppningskoefficient tagits fram och tillämpats på det teoretiska ideala icke-viskösa flödet.

De resulterande in- och utflödet kan beskrivas enligt följande:

$$Q_n = \frac{K}{3} W (g'H^3)^{0.5} \quad [1]$$

där  $K$  är öppningskoefficienten,  $W$  är bredden på öppningen och  $H$  är höjden. Den effektiva gravitationen  $g' = g\Delta\rho / \rho_a$  där  $\Delta\rho$  är densitetsskillnaden mellan inomhusluften och luften utomhus och  $\rho_a$  är medelvärdet av dessa luftmassor. Öppningskoefficienten  $K$  är en kombination av mynnings- och blandnings koefficient enligt följande:

$$K = C_d(1 - C_m) \quad [2]$$

Mynningskoefficienten  $C_d$  inkluderar kontraktionen av strömningslinjerna, separationer i strömningen eller viskösa förluster genom öppningen, medan blandningskoefficienten  $C_m$  beaktar återinblandningen av motströmmande flöde. Luftflödet genom en port är alltså beroende på portens utformning och temperaturskillnaden mellan lokalen och uteluften. Enligt ekvation 1 så påverkar portens utformning luftströmningen genom tre parametrar; öppningens bredd  $W$ , dess höjd  $H$  och öppningens utformning  $K$ .

Mätningarna på en 2.06 meter hög och 0.91 meter bred dörr av Wilson och Kiel (1990) gav följande förhållande för öppningskoefficienten  $K$  som funktion av temperaturskillnaden mellan byggnaden och omgivningen:

$$K = 0.400 + 0.0045\Delta T \quad [3]$$

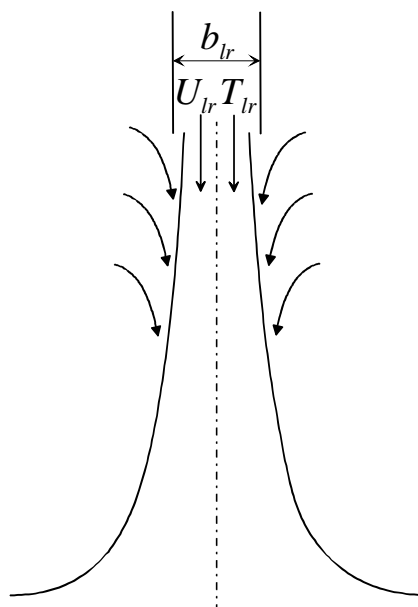
Mätningar på en 2.5 meter hög och 1.8 meter bred öppning i ett kylt rum genomförda av Fritzsche och Lilienblum (1968) fick värden på öppningskoefficienten som funktion av temperaturskillnaden enligt följande:

$$K = 0.476 + 0.0043\Delta T \quad [4]$$

Genom CFD beräkningar kommer värden på öppningskoefficienten att tas fram. Dessa kommer sedan att jämföras med de värden som finns i energisimuleringsprogrammet Simulink.

## 2.2 Luftridåer

En luftridå kan beskrivas som en lokal ventilationsinstallation som används i en byggnad för att reducera luftläckaget genom en öppning i byggnadsskalet eller för att skärma av processutrustning inne i byggnaden. Luftridån kan bestå av en eller flera jetstrålar med en specifik hastighet och vinkel med syfte att reducera naturlig cirkulation och luftutbyte mellan det utrymme man vill skärma av och omgivningen, se Figur 2. Här kan visas en skiss av en luftridå med dess bredd  $b_{lr}$ , inloppshastigheten  $U_{lr}$  och temperaturen  $T_{lr}$  på luften vid inloppet. Vid luftridåns inlopp bildas en jetstråle som efter hand växer och blir bredare genom att dra med sig luft från omgivningen. Bredden och turbulensintensiteten i luftridån ökar således med avståndet från inloppet.



Figur 2. Principskiss av en luftridå

En luftridå ska oftast se till att reducera värme- och fukttransport genom öppningen men den kan även utformas för att förhindra insekter och smuts kommer in i byggnaden men även minska påverkan från vinden. Den drivkraft som tryckskillnaden mellan byggnaden och omgivningen ger upphov till kan reduceras med hjälp av en luftridå. För att minska effekterna av denna drivkraft måste luftridån ha en tillräckligt hög impulskraft. Samtidigt bör inte luftridåns hastighet bli för hög vilket kan orsaka ökande värmeväxling genom ridån samtidigt som ridåns egen energianvändning ökar. Med en korrekt installerad och utformad luftridå finns det möjlighet att uppnå följande fördelar:

- Förbättring av inomhusklimatet och arbetsförhållandena nära öppningen
- Öka den utnyttbara arbetsytan nära öppningen genom att förhindra inträngning av utomhusluft
- Reducera energianvändningen i form av uppvärmning eller kylning av lokalen

Beroende på användningsområde och strömningsbild finns det olika typer av luftridåer. Den vanligaste typen av luftridå är de som är placerade i öppningar och portar för att förhindra inträngning av utomhusluft. Dessa luftridåer kan arbeta med inomhusluft (uppvärmd eller inte) men även vara kombinerade luftridåer med inomhusluft och eller

också luftridåer med ouppvärmad utomhusluft. Sedan finns det luftridåer som är särskilt framtagna för kyllda rum, portar med långa passager och för processutrustning. Man kan även dela in luftridåerna efter om det är människor eller fordon som passerar genom öppningen. I affärer, shoppingcentra eller andra offentliga lokaler får inte luftridåns hastighet vara för hög så att dragproblem uppstår. Dessa luftridåer måste ha låga inloppshastigheter och för att bibehålla funktionen och skyddet blir dessa relativt breda. I portar där det däremot inte förekommer någon persontrafik kan hastigheten på luftridån ökas och bredden minskas betydligt vilket ger en kompaktare enhet.

Effektiviteten på en luftridå bestäms genom att jämföra hur mycket värme som transporteras genom en öppning med luftridå jämfört med samma öppning utan någon luftridå. Mätningar utförda av Hetsroni med flera (1963, 1964) visar att värmeöverföringen minskar med 60 till 85 procent med en luftridå i öppningen. Däremot om luftridåns inloppshastighet är för hög kan energiutbytet genom öppningen till och med bli högre än utan luftridå. Det motsatta förhållandet, om inloppshastigheten blir för låg, kommer istället tryckskillnaden mellan byggnaden och omgivningen leda till att luftridån inte når ner till marken vilket leder till ett högt luftutbyte och en stor energianvändning genom öppningen. Detta visar på att det finns en optimal hastighet där värmeväxlingen genom porten har ett minimum. För att uppnå en väl fungerande och effektiv luftridå gäller det att hitta denna hastighet för att erhålla lägsta möjliga energiförlust genom öppningen och samtidigt inte behöva tillföra mer energi för driften av luftridån än nödvändigt.

Funktionen hos en luftridå påverkas av flera olika parametrar; antalet ridåer, tjockleken på ridån, bredden och höjden på porten/öppningen, luftridåns inloppshastighet, luftridåns turbulens intensitet vid inloppet, och tryck- och temperaturskillnaden över ridån. Ur energisynpunkt är det önskvärt att minimera luftflödet mellan byggnaden och omgivningen. Detta kräver att luftridån designas på ett optimalt sätt för att säkerställa en god skyddande funktion samtidigt som man minimerar transporten av värme, fukt och föroreningar in i byggnaden.

En luftridåns impuls kraft kan beräknas enligt följande:

$$F = \rho A U_{lr}^2 \quad [5]$$

Där  $A$  ( $b_l \times l_{lr}$ ) är arean på luftridåns inlopp och  $U_{lr}$  luftridåns inloppshastighet. För en bestämd portstorlek, det vill säga  $l$  är konstant, kan man undersöka hur funktionen hos luftridåer med samma impuls kraft påverkas vid olika kombinationer av ridåbredd och hastighet. Tidigare studier har visat att om man jämför två luftridåer med samma impuls kraft fast med olika bredd och inloppshastighet är den bredare luftridå effektivare än den luftridån med högre hastighet. Denna slutsats har bland annat Hayes och Stoecker (1969b) samt Axell (2002) kommit fram till.

I denna studie har en luftridå, avsedd för att förhindra att kall uteluft kommer in i byggnaden, med samma tilluftstemperatur som rumsluften utvärderats. För att undersöka funktionen hos luftridån har dess randvillkor varierats. Olika storlekar på porten har använts för att undersöka vilken effekt det får på luftridåns möjlighet att förhindra den kalla uteluften att komma in i byggnaden. Vidare har uteluftens temperatur varierats för att se hur det påverkar luftridån. För att variera luftridåns impuls kraft har inloppshastigheten och bredden på luftridån ändrats.

## 3 Numeriska simuleringar

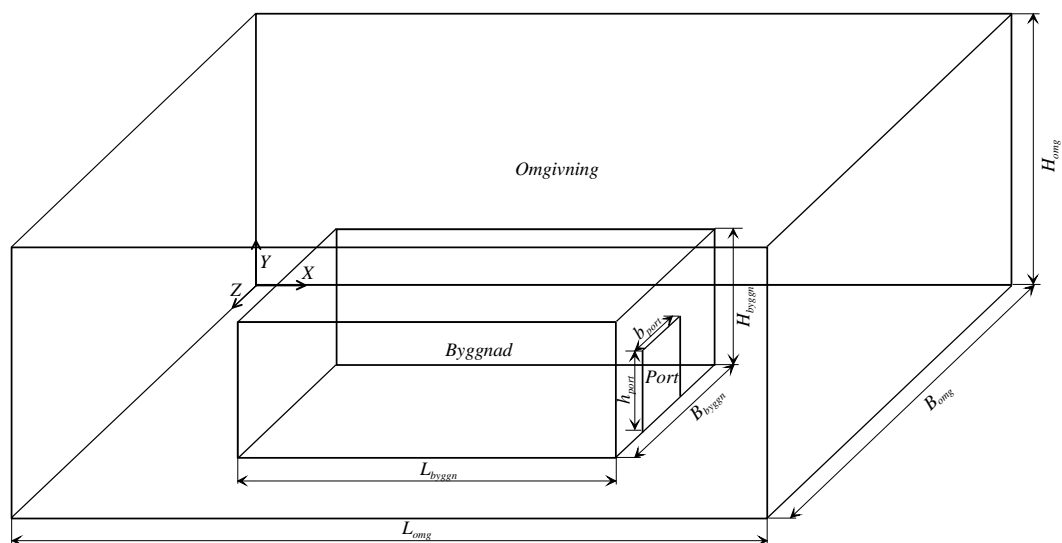
För utvärderingen av luftströmningen genom en industriport har numeriska beräkningar använts. För den huvudsakliga undersökningen har Computational Fluid Dynamics (CFD) tillämpats. För att verifiera CFD-resultaten har även beräkningar genomförts med Simulink. I Simulink har dessutom mätningresultat från tidigare studier implementerats.

### 3.1 CFD beräkningar

För att utvärdera luftströmningen och temperaturfältet i och runt byggnaden har CFD beräkningar använts. Eftersom luftutbytet mellan lokalen och omgivningen varierar över tiden har beräkningarna varit tidsberoende. Anledningen till att luftutbytet varierar över tiden beror på att när den kalla uteluften kommer in i lokalen sjunker temperaturen på lokalen vilket leder till att den termiska drivkraften mellan lokalen och omgivningen förändras. Eftersom den termiska drivkraften beror på densitetsskillnaden mellan de olika luftmassorna kommer den att avta med tiden för att efter en viss tid uppnå ett visst jämviktstillstånd. För större delen av utvärderingen kommer dock 30 sekunder att användas då denna tid anses vara en vanlig öppningstid för en normal industriport som används för passage av fordon. Med CFD-metoden delas den totala beräkningsvolymen in i ett antal mindre kontrollvolym i vilken rörelse- och energiekvationerna löses. Dessa mindre kontrollvolym bildar sedan tillsammans en så kallad mesh.

#### 3.1.1 Modell av industrilokalen

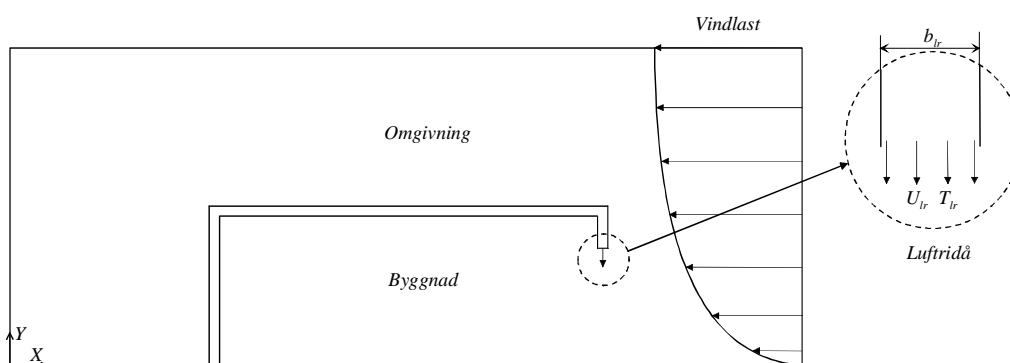
En industrilokal med en öppning i en av kortsidorna har använts för att simulera luft- och energiutbytet genom porten, se Figur 3. I figuren kan man se industrilokalen ( $L_{byggn} \times B_{byggn} \times H_{byggn}$ ) med dess port ( $h_{port} \times b_{port}$ ) i byggnadens ena kortsida. Dessutom visas den omgivande volymen ( $L_{omg} \times B_{omg} \times H_{omg}$ ) som är den totala storleken på beräkningsvolymen. Denna omgivande volym har inkluderats i modellen för att kunna simulera luftströmmarna och temperaturfördelningen även utanför byggnaden. Ett antal olika beräkningar genomfördes för att se om storleken på denna volym påverkade resultatet. Dessutom har en luftridå placerats i öppningen för att undersöka dess funktion och förmåga att förhindra kall uteluft att tränga in i lokalen. Där luftridåns längd ( $l_r$ ) är samma som bredden på porten ( $b_{port}$ ) och bredden på luftridån är  $b_{lr}$ , se Figur 4.



Figur 3. Modell av byggnaden och omgivningen

### 3.1.2 Meshgenerering

För att generera lösningar med bra kvalitet är det viktigt att man skapar en mesh med en så bra fördelning som möjligt, särskilt nära väggarna och vid öppningen. För att reducera beräkningstiden så har endast halva modellen utvärderats, se Figur 4. Genom att utnyttja symmetrin i modellen behöver bara ena halvan av modellen beräknas eftersom samma resultat genereras på varje sida om symmetrilinjen. Vid uträkningen av resulterande luftflöden och energiutbyte genom porten används hela porten och byggnaden, det vill säga de resultat som erhöles från beräkningarna dubblas för att erhålla det totala för hela lokalen. En mesh med kubiska element har använts inne i byggnaden och i öppningen. Däremot, utanför byggnaden, har istället tetraeder/hybrid element tillämpats för att åstadkomma en bra övergång mellan de mindre elementen inne i byggnaden och de större elementen i omgivningen. Detta har även gjorts för att hålla nere antalet beräkningsceller och den resulterande beräkningstiden.



Figur 4. Modellen (i symmetrilinjen) med vindlast och luftrida

För att beräkna strömningen genom porten är det inte nödvändigt att ha en hög noggrannhet i omgivningen långt ifrån byggnaden och därför kan man tillåta att ha betydligt större element där. På så sätt kan man kraftigt reducera antalet element i modellen. Däremot har meshen varit tätare intill väggarna och vid porten. Detta för att på ett korrekt sätt beräkna friktionskrafterna som uppstår längs de olika ytorna, men eftersom att fokus ligger på strömningen genom öppning är det viktigt att ha en bra upplösning även där. Beroende på antal celler i modellen så var beräkningstiden för ett fall 10-15 timmar. Antalet element i de olika modellerna varierade mellan 400 000 och 850 000 beroende på storlek på byggnaden och porten där merparten av modellerna hade cirka 550 000 element. Genom att endast halva byggnaden har inkluderats i modellen har beräkningstiden kortats ner till ungefär en fjärdedel av vad som hade varit fallet om hela byggnaden hade beaktats. För att konstruera de olika mesharna användes mesh-genereringsprogrammet Gambit 2.1.6.

### 3.1.3 Randvillkor

Strömningen i modellen är betraktad som 3-dimensionell, tidsberoende och turbulent. Ingen värmeöverföring via väggar, golv eller tak inne i lokalen har tagits med i beräkningarna. Som startvärde var lokalens temperatur 20°C medan omgivningens temperatur varierades mellan -20 och +10°C. För att skapa en omgivning med konstant temperatur och samtidigt tillåta strömning genom de omslutande ytorna ansattes dessa ytor som så kallade "pressure outlets". På så sätt så kan den uppvärmda luften från lokalen ta sig ut genom de omgivande ytorna samtidigt som den luften som kommer in har den temperatur som satts som randvillkor på omgivningen.

Vad gäller bredd och hastighet på luftridan så har dessa varierats mellan 5 och 15 cm och hastigheten mellan 5 och 20 m/s, se utförligare beskrivning nedan. För att ansätta värden



på turbulensnivån vid luftridåns inlopp har värden på den turbulenta kinetiska energin,  $k_{in}$ , och dess dissipation,  $\varepsilon_{in}$  beräknats. Följande uttryck av Davidson och Karlsson (1988) har använts:

$$k_{in} = (0.01 \cdot U_{in})^2, \varepsilon_{in} = C_{\mu}^{0.75} \cdot k_{in}^{1.5} \cdot b^{-1} \quad [6]$$

Där  $b = 4A/O$  är inloppets hydrauliska diameter.

### 3.1.4 Numeriska inställningar

För att lösa det turbulenta strömningsfältet har RNG  $k-\varepsilon$  modellen, utvecklad av Yakhot och Orszag (1986) använts. Denna turbulensmodell har i flera studier funnits fungera väl för beräkning av temperaturberoende strömning, se Chen (1995) och Törnström (2003). För diskretisering av hastigheten, den turbulenta kinetiska energin och dess dissipation samt temperaturen användes ett andra ordningens ”upwind scheme”. Som konvergenskriterium, det vill säga det maximala relativa felet mellan två iterationer för varje variabel, sattes en gräns på  $10^{-4}$ . För varje tidssteg i beräkningen användes 30 iterationer för att få en god noggrannhet i resultaten. Den kommersiella CFD-koden FLUENT 6.1.22 användes för beräkningen av luftströmningen och temperaturfördelningen i modellen.

## 3.2 Simulink beräkningar

Som ett komplement till CFD-beräkningar har även simuleringar med en simulinkmodell av byggnaden genomförts. Simulinkmodellen har sitt ursprung i SPs modell för simulering av termiskt klimat i byggnader, SPsim, men har anpassats till de geometrier med mera som gäller för denna modell. Denna modell består av en serie kopplade första ordningens differentialekvationer och modellerar värmeöverföring i väggar, tak och golv, lufttemperaturens dynamik samt luftströmning genom porten. Modellen är endimensionell i den mening att temperaturer för varje byggnadselement så som vägg, tak, golv och dess beståndsdelar representeras av en enda temperatur och dess motsvarande differentialekvation. Däremot inverkar den 3-dimensionella geometrin genom att areor för byggnadselement och volym för rummet ingår som parametrar i differentialekvationerna. Vidare inverkar geometrin genom att värmestrålning modelleras mellan byggnadselement.

I den befintliga modellen används följande formel för beräkning av det totala luftutbytet (summan av luftflödet in och ut genom porten):

$$L_d = 50 A_f (H_f \Delta T)^{0.5} \quad [7]$$

Här är  $A_f$  portens/öppningens area och  $H_f$  dess höjd och 50 en konstant som är oberoende av temperaturskillnaden. För att få ut ett värde på öppningskoefficienten  $K$  behövs ekvation [7] skrivas om för att få den på samma form som [1]. Uttrycket för den effektiva gravitationen  $g'$  i [1] kan skrivas om enligt följande:

$$g' = g \Delta \rho / \rho_a = g \beta \Delta T \quad [8]$$

Där  $\beta = 1/273$  är den termiska expansionskoefficienten. Genom att implementera denna omskrivning av  $g'$  erhålls följande form av [1]:

$$Q_n = \frac{KWH}{3} (g\beta H \Delta T)^{0.5} = \frac{KWH}{3} (g\beta)^{0.5} (H \Delta T)^{0.5} \quad [9]$$

Eftersom  $Q_n$  representerar volymflödet in eller ut genom porten och  $L_d$  är totala luftutbytet måste  $Q_n$  multipliceras med en faktor 2 för att erhålla det totala luftutbytet genom porten. Genom jämförelse av [7] och [9] och fås följande samband:

$$\frac{2K}{3}(g\beta)^{0.5} = 50, \Rightarrow K = 0.396 \quad [10]$$

Detta värde överensstämmer väl med mätningarna av Wilson och Kiel (1990) för små temperaturskillnader men eftersom koefficienten enligt ekvation [10] inte är temperaturberoende blir avvikelsen större ju större temperaturskillnaden blir.

## 4 Beräkningsfall

CFD beräkningar har använts för att utvärdera ett antal portar med och utan en luftridå i öppningen. För validering av CFD beräkningarna, med tidigare genomförda mätningar och med energisimuleringsprogrammet Simulink, har ett antal av fallen utan luftridå använts. Innan utvärderingen av porten och dess energi- och luftutbyte påbörjades genomfördes ett antal beräkningsfall. Detta gjordes för att bestämma hur stor del av omgivningen kring byggnaden som behövs inkluderas i modellen. Dessutom utvärderades hur långa tidsstegen kunde vara för att erhålla hög noggrannhet samtidigt som beräkningstiden begränsades. Vi har valt att använda samma temperatur på luften inne i byggnaden för alla fallen. Eftersom att beräkningarna är tidsberoende har vi använt ett initialvärde på temperaturen inne i byggnaden som varit 20°C.

### 4.1 Port utan luftridå

För att kartlägga hur mycket luft som växlas genom en port samt vilket energiutbyte som sker mellan byggnaden och omgivningen har olika parametrar avseende byggnaden och omgivningen varierats. De parametrar som undersökts är följande; utomhustemperaturen, storleken på lokalen, portens utformning och vindens påverkan. Som grundfall vid valideringen med Simulink och vid beräkningen av öppningskoefficienten  $K$  användes en port på 4×4 meter och en byggnadsstorlek på 20×6×10 ( $L_{byggn} \times H_{byggn} \times B_{byggn}$ ) m. En sammanställning av samtliga fall utan luftridå finns i bilaga 1.

#### 4.1.1 Temperaturdifferens

För att undersöka hur stor drivkraft som densitetsskillnaden mellan de olika luftmängderna inne i byggnaden och omgivningen ger upphov till har omgivningens temperatur varierats. Denna densitetsskillnad ger en tryckskillnad över öppningen som genererar en luftväxling genom porten. Temperaturen utomhus har varierats mellan 10, 0, -10 och -20°C vilket resulterar i temperaturdifferenser på 10 till 40°C. Den lägsta temperaturen -20°C kan anses som den dimensionerande temperaturen som då ger den största termiska drivkraften som en luftridå ska klara av att stå emot. I samtliga fall var initialvärdet på temperaturen inne i byggnaden 20°C.

#### 4.1.2 Byggnadsstorlek

Storleken på byggnaden varierades för att utvärdera hur volymen på en industrilokal påverkar luftutbytet genom porten. Beroende på volymen på lokalen har luften en varierande värmeackumulerande massa. Det är därför intressant att undersöka om detta påverkar luftväxlingen genom porten. För att erhålla ett rimligt antal beräkningsfall är det nödvändigt att göra begränsningar avseende vilka parametrar som ska studeras. I denna studie har längden och höjden på lokalen satts som konstanta medan olika bredder på lokalen har använts. Breddarna 6, 10, 20 m har utvärderats för att variera volymen på lokalen. Längden 20 m och höjden 6 meter har använts i samtliga fall. Detta har utförts med portstorleken 4×4 och med en omgivningstemperatur på 0°C.

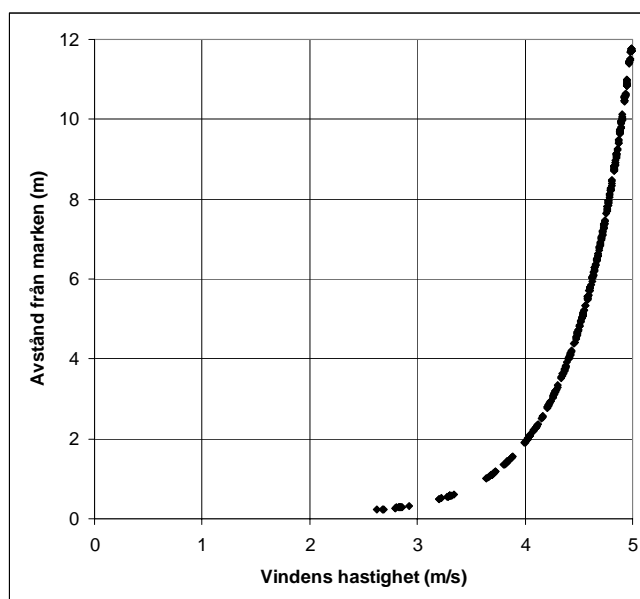
#### 4.1.3 Portens storlek

Storleken på porten och förhållandet mellan höjden och bredden har varierats för att undersöka dess inverkan på luftflödet genom porten och energiförlusterna. Det är naturligt att anta att ju större öppningen i byggnaden är desto större blir luftutbytet och energianvändningen för att värma upp lokalen igen. Det som är mer intressant att undersöka är hur förhållandet mellan höjden och bredden på porten påverkar luftutbytet. Storleken på en normalport i en industrilokal är cirka 4×4 m. För att täcka in ett stort

område av portstorlekar har portar från 3×3 m upp till 5×5 m undersökts. Höjden och bredden på porten har således varierats mellan 3, 4 och 5 m vilket totalt ger nio olika fall. Utvärderingen har gjorts för byggnadsstorleken 20×6×10 m och utomhustemperaturen 0°C.

#### 4.1.4 Vindlast

För att undersöka vilken inverkan vindpåverkan har på luftutbytet genom porten har en portstorlek vid en omgivningstemperatur utvärderats. Denna körning genomfördes för porten 4×4 med omgivningstemperaturen -20°C. Vindlasten lades på så att den blåste in rakt mot porten från höger i modellen, se Figur 4. Se Figur 5 för en utseendet på vindprofilen.



Figur 5. Vindprofil för fallen med vindlast

För uträkning av vindprofilens utformning användes följande logaritmiska funktion från Etheridge och Sandberg (1996):

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{0.4} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \quad [11]$$

Där  $U_*$  är friktionshastigheten,  $z$  är koordinaterna i höjddled,  $d$  är neutralplanetets förskjutning och  $z_0$  är en längd som karakteriserar skrovligheten på marken. Värdena på dessa parametrar valdes så att vindens hastighet uppnådde 5 m/s 12 meter över marken (vilket motsvarar den totala höjden på omgivningen).

## 4.2 Port med luftridå

För utvärderingen av luftridåns funktion har tre olika portstorlekar, 3×3 m, 4×4 m och 5×5 m utvärderats. Detta har gjorts för byggnadsstorleken 20×10×6 ( $L_{byggn} \times B_{byggn} \times H_{byggn}$ ) m vid omgivningstemperaturerna 0°C och -20°C. Som inblåsningstemperatur på luftridån har 20°C använts där det är luften från byggnaden som dras igenom luftridån. Eftersom temperaturen på luften inne i lokalen sjunker när en kallare omgivningsluften tränger in i byggnaden måste en viss mängd värmeenergi tillföras till luftridån för att värma upp den till 20°C igen. Dessutom åtgår det en viss mängd energi för fläktarbetet med att driva

luften genom ridån. Summan av dessa två energimängder har inkluderats vid utvärderingen av energiförlusterna genom porten för att få luftridåns totala energi-användning. Nedan följer en beskrivning av de parametrar avseende luftridån som undersökts. En fullständig förteckning av fallen finns i bilaga 2.

### 4.2.1 Bredd och hastighet på luftridån

Avseende luftridåns parametrar har bredden och inloppshastigheten varierats. För porten 3×3 har hastigheter på 5, 10, 15 m/s och bredder på 5 och 10 cm undersökts. För mellanporten 4×4 har hastigheterna varit 10 och 15 m/s med bredden 5 och 10 cm. För den största porten 5×5 har hastigheterna varit 5, 10, 15 och 20 m/s och bredden 10 och 15 cm. Turbulensintensiteten vid luftridåns inlopp var 1 % vilket överensstämmer med de värden som använts i merparten av tidigare studier på luftridåer. Studien av Howell med flera (1976) har visat att luftridåns turbulensintensitet (TI) vid inloppet kan ha en stor inverkan på värmetransporten genom luftridån. Det är därför en parameter som bör utvärderas mera utförligt i framtida studier. Begränsningar finns dock i vad som är möjligt att praktiskt åstadkomma när man konstruerar luftridåer. För att undersöka vilken inverkan TI har på energiutbytet med omgivningen har körningar även genomförts med TI = 10 %. Detta ger följande samband för beräkning av den turbulenta kinetiska energin  $k_{in}$ :

$$k_{in} = (0.1 \cdot U_{in})^2 \quad [12]$$

Detta har gjorts för porten 4×4 vid omgivningstemperaturen 0°C. Vid dessa körningar var bredden 5 och 10 cm och hastigheterna på luftridån 10 och 15 m/s.

### 4.2.2 Luftridåns impuls kraft

För att bedöma funktionen hos en luftridå använder man oftast ridåns impuls kraft som inkluderar både hastigheten och bredden. Förhållandet mellan dessa parametrar avgör sedan hur effektiv en luftridå blir. För att luftridån ska ha en bra funktion, det vill säga skärma av en öppning eller passage mot inkommande luft, behöver den ha en viss impuls kraft. Detta behövs för att stå emot den tryckskillnad som bildas på grund av densitetsskillnaden mellan lokalen och omgivningen. Men det är samtidigt viktigt att impuls kraften inte blir för hög vilket istället kan ge ett ökat energiutbyte i öppningen. Enligt ekvation [5] beror impuls kraften av arean på inloppet och inloppshastigheten. Genom att variera dessa parametrar vid bibehållen impuls kraft kan deras inverkan på det resulterande energiutbytet genom porten undersökas. Porten 4×4 m vid omgivningstemperaturen 0°C med tre olika impuls krafter på luftridån har studerats. För luftridåbredderna 5 och 10 cm har hastigheterna varierats så att samma impuls kraft erhålls för båda bredderna.

### 4.2.3 Vindlast

En luftridåns förmåga att stå emot vindlast har också undersökts. För denna undersökning har tre fall med en luftridå med hastigheterna 10, 15 och 20 m/s vid omgivningstemperaturen -20°C testats. Storleken på porten var 4×4 m och bredden på ridån var 10 cm. Vindprofilen enligt ekvation [11] tillämpades med samma hastighet, 5 m/s, som för porten utan luftridå.

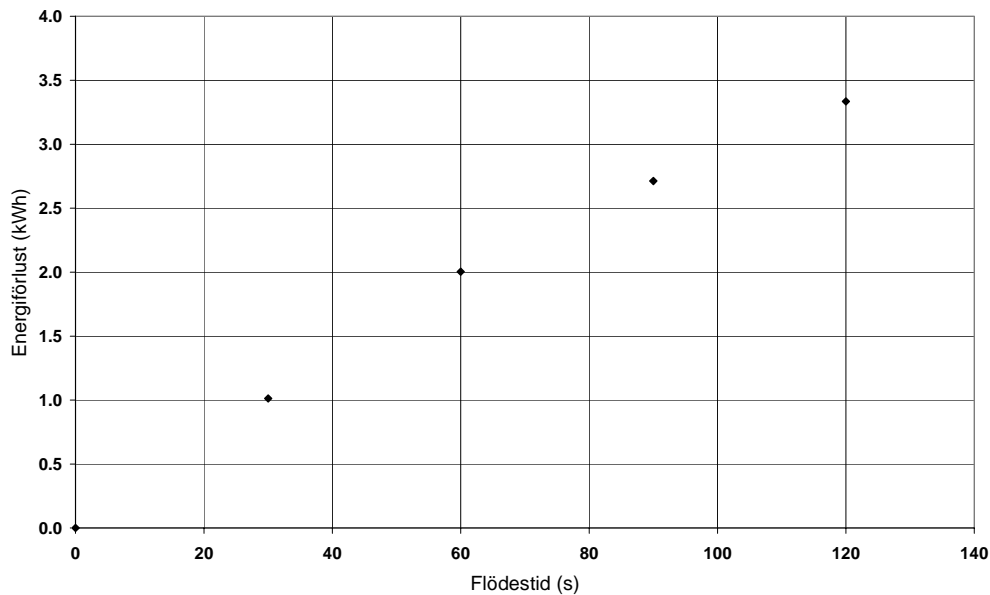
## 5 Resultat

Här följer resultaten från beräkningarna med CFD och Simulink. Dessutom redovisas en jämförelse med mätningar utförda av Wilson och Kiel (1990) samt Fritzsche och Lilienblum (1968). Beräkningstiden var 30 sekunder i samtliga fall i utvärderingen. Denna tid valdes utifrån två aspekter. Dels för att begränsa beräkningstiden för simuleringen som är direkt proportionerlig mot flödestiden, men även för att 30 sekunder motsvarar den tid en standardport är öppen vid passage.

För att få en lösning med god noggrannhet delas flödestiden in i mindre beräkningssteg. Ju mindre dessa är bestå högre noggrannhet men till bekostnaden av längre total simuleringsstid för varje körning. Därför gjordes en jämförelse mellan olika längd på beräkningsstegen för att hitta en optimal längd på beräkningstiden som ger en tillräckligt noggrann lösning till en rimligt lång beräkningstid. Körningar med 0.25, 0.5, 1 och 2 sekunder genomfördes. Jämförelse mellan de olika fallen visade på att steglängden behövde vara 0.5 sekunder under de första 10 sekunderna medan stegen kunde vara 1 sekund under de återstående 20 sekunderna av beräkningstiden.

Beräkningar genomfördes med olika storlek på omgivningen för att se vilken effekt detta hade på beräkningsresultatet. I modellen ändrades längden, bredden och höjden på omgivningen. Dessutom var syftet att få en modell med så få celler/element som möjligt men samtidigt få en god upplösning och noggrannhet i resultaten. Den modell som fanns ge resultat med god överensstämmelse med de andra modellerna och samtidigt få en mesh med minsta antalet celler var då  $L_{omg} = 40$  m,  $B_{omg} = 30$  m samt  $H_{omg} = 12$  m. Detta motsvarar en halv byggnadslängd framför och bakom byggnaden, en byggnadsbredd bredvid och en extra byggnadshöjd över byggnaden.

En utvärdering av energiutbytet genom en öppen port genomfördes för grundfallet, porten  $4 \times 4$  byggnadsstorleken  $20 \times 6 \times 10$  ( $L_{byggn} \times H_{byggn} \times B_{byggn}$ ) vid utomhustemperaturen  $0^\circ\text{C}$ . I Figur 6 kan man se att energiutbytet ökar linjärt med tiden de första 60 sekunder för att sedan få en något lägre ökningstakt under de avslutande 60 sekunderna. Detta kan bero på att ett jämviktstillstånd erhålls i byggnaden efter de första 60 sekunderna med en "kudde" med varm luft under taket. Efter denna tid ökar inte förlusterna med samma hastighet som i början. Detta beror på att drivkraften mellan lokalen och omgivningen minskar eftersom temperaturen i lokalen minskar och då närmar sig omgivningens temperatur.



Figur 6. Energiförlusten genom en port som funktion av tiden

Genom en linjär approximation erhålls följande samband för energiförlusten genom porten som funktion av tiden:

$$E = 0.0279 \cdot t + 0.1385 \quad [13]$$

## 5.1 Port utan luftridå

Här följer resultaten från beräkningarna för porten utan luftridå. Först redovisas resultaten från valideringen av CFD beräkningarna där mätresultat som implementerades i Simulinkmodellen användes. Därefter följer resultaten från CFD beräkningarna med avseende på följande parametrar; utomhustemperaturen, storleken på lokalen, portens utformning och vindens påverkan. Eftersom fokus i undersökningen ligger på att utvärdera energiutbytet genom porten kommer oftast detta presenteras i resultatet. I samtliga dessa fall var den totala öppningstiden på porten 30 sekunder.

I Simulink används det totala luftflödet genom porten och temperaturskillnaden mellan byggnaden och omgivningen för att bestämma energiutbytet genom porten. Därför användes detta sätt vid jämförelsen mellan CFD och Simulink. I samtliga övriga fall beräknas energiutbytet genom porten utifrån medelvärdet på luftens temperatur i byggnaden efter 30 sekunder. Där motsvarar energiutbytet den energimängd som byggnaden har förlorat på grund av att temperaturen har sjunkit från de ursprungliga 20°C vid beräkningens början. Detta sätt att beräkna utbytet motsvarar den energimängd som då måste ersättas genom att tillföra värme till byggnaden för att åter ha en komfortabel temperatur i byggnaden.

### 5.1.1 Jämförelse med Simulink

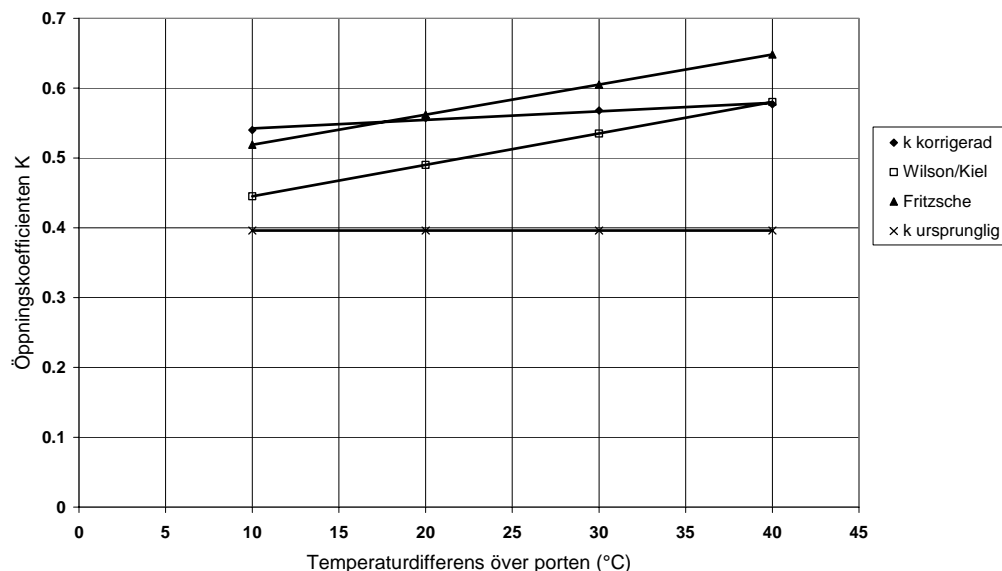
För att utvärdera CFD resultaten genomfördes beräkningar med Simulink. I Simulink gjordes körningar med den ursprungliga modellen samt med korrigerade värden på öppningskoefficienten  $K$ . De parametrar som utvärderades var totalt luftflöde och totalt energiutbyte genom porten. För validering av luftutbytet genom porten gjordes även jämförelse med mätningarna av Wilson och Kiel (1990) samt Fritzsche och Lilienbaum (1968).

Som utgångspunkt valdes att jämföra resultaten för grundfallet, portstorleken 4×4 m och byggnadsstorleken 20×6×10 ( $L_{byggn} \times H_{byggn} \times B_{byggn}$ ) m. I detta fall var byggnaden i sitt grundutförande, med en inomhustemperatur på initialt 20°C och utomhustemperatur på 0°C. Med simulinkmodellen i sitt ursprungliga skick så när som på ändrad geometri för den aktuella byggnaden så skiljde det cirka 40 % i värmeförlust och cirka 40 % i totalt luftflöde genom porten.

Denna skillnad beror bland annat på att den ursprungliga öppningskoefficienten  $K$  i Simulinkmodellen är betydligt mindre än de värden som tidigare har uppmätts och som CFD beräkningarna gav. Dessutom är värdet i Simulinkmodellen inte temperaturberoende vilket förklarar att skillnaden tilltar då temperaturdifferensen ökar. Därför behövde ett nytt uttryck för denna koefficient tas som beror på temperaturskillnaden.

Nästa steg var att ändra värdet på koefficienten  $K$  som funktion av temperaturdifferensen så att det totala luftflödet genom porten blev det samma för simulinkmodellen och CFD-modellen. För att göra detta användes fyra olika simuleringar där temperaturdifferensen varierar från -20°C till 10°C vilket resulterade i temperaturdifferenser från 10 till 40°C. I Figur 7 redovisas det ursprungliga värdet i Simulink samt det korrigerade värdet där CFD beräkningarna användes som jämförelse. Dessutom visas de uppmätta värdena för  $K$  som funktion av temperaturskillnad över porten. De ursprungliga värdena på  $K$  var betydligt lägre än både de som CFD beräkningarna gav upphov till men även de uppmätta värdena. De korrigerade värdena var något högre än de uppmätta värdena vid små temperaturskillnader medan skillnaden minskade för de större skillnaderna. Efter korrigeringen av  $K$  erhöles följande uttryck som funktion av temperaturskillnaden:

$$K = 0.53 + 0.0012 \Delta T \quad [14]$$

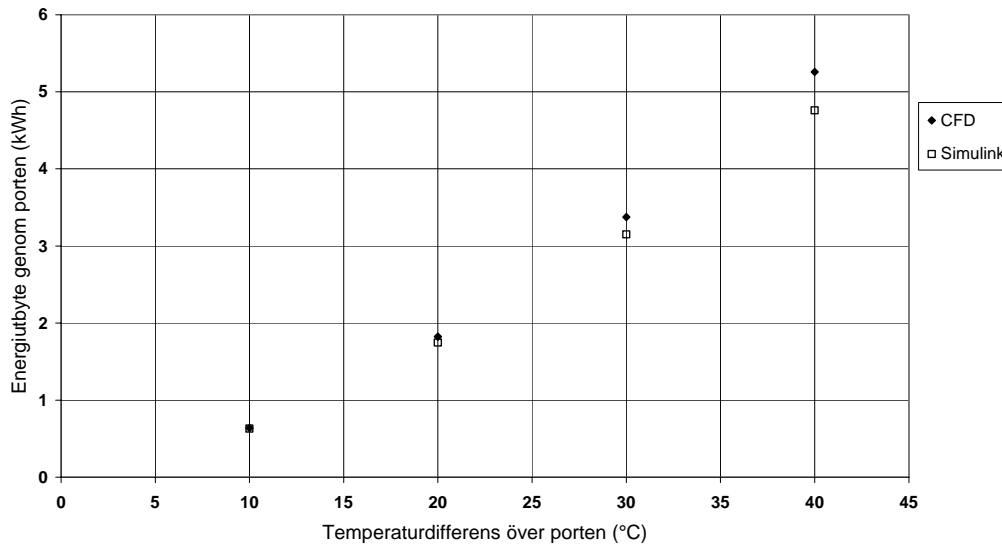


Figur 7. Öppningskoefficienten som funktion av temperaturdifferensen

Med detta korrigerade värde på  $K$  utvärderades skillnad i energiutbyte genom porten mellan Simulinkmodellen och CFD-modellen. Detta energiutbyte är alltså beräknat utifrån luftflödet genom porten och temperaturskillnaden mellan byggnaden och omgivningen. Avvikelsen mellan CFD beräkningarna och Simulink varierar beroende på temperaturdifferensen och ligger mellan 0 och 10 %, se Figur 8. Energiutbytet genom



porten är lägre då den beräknas med simulinkmodellen och det beror på att i denna modell så modelleras även värmeförlust genom väggar, golv och tak vilket leder till en lägre temperatur i byggnaden vilket i sin tur leder till ett mindre energiutbyte genom porten.



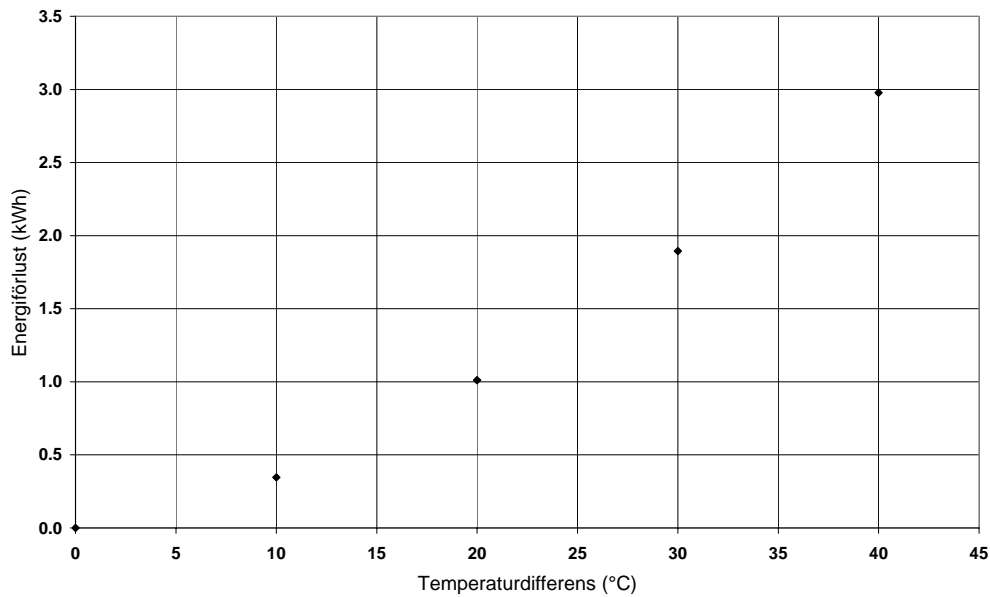
Figur 8. Energiutbytet som funktion av temperaturdifferensen

Med konstant omgivningstemperatur på 0°C varierades sedan byggnadens och portens storlek. Byggnadens storlek ändrades genom att variera bredden, mellan 6, 10 och 20 m, medan höjden och längden på byggnaden var konstanta. Skillnaden i energiutbyte genom porten varierade för dessa fall mellan 2 och 10 % och skillnaden i totalt luftflöde varierade mellan 0 och 4 %. För att jämföra resultaten mellan Simulink och CFD avseende portens storlek och utformning testades breddarna och höjderna 3,4 och 5 meter. Skillnaden i energiutbyte genom porten varierade för dessa fall mellan 1 och 13 % och skillnaden i totalt luftflöde varierade mellan 0 och 6 %. På motsvarande sätt som ovan så blir energiutbytet genom porten lägre då Simulinkmodellen används än vad CFD beräkningarna gav. Orsaker till skillnader mellan Simulink och CFD beror bland annat på det förenklade sätt som Simulink beräknar luftutbytet genom öppningar. Simulink tar inte hänsyn till de dynamiska effekter som uppstår vid öppningen vilket däremot CFD gör.

### 5.1.2 Temperaturdifferens

Den energi som går förlorad genom att porten är öppen beror på att byggnadens temperatur sjunker då den kallare omgivningsluften tränger in i byggnaden. Denna energimängd måste sedan tillföras till byggnaden för att åter uppnå en inomhustemperatur på 20°C. I Figur 9 visas den energi som går förlorad under 30 sekunder som funktion av temperaturskillnaden mellan byggnaden och omgivningen. Genom en approximation med ett andra gradens polynom kan man få fram följande uttryck för energiförlusten,  $E$ , som funktion av temperaturdifferensen:

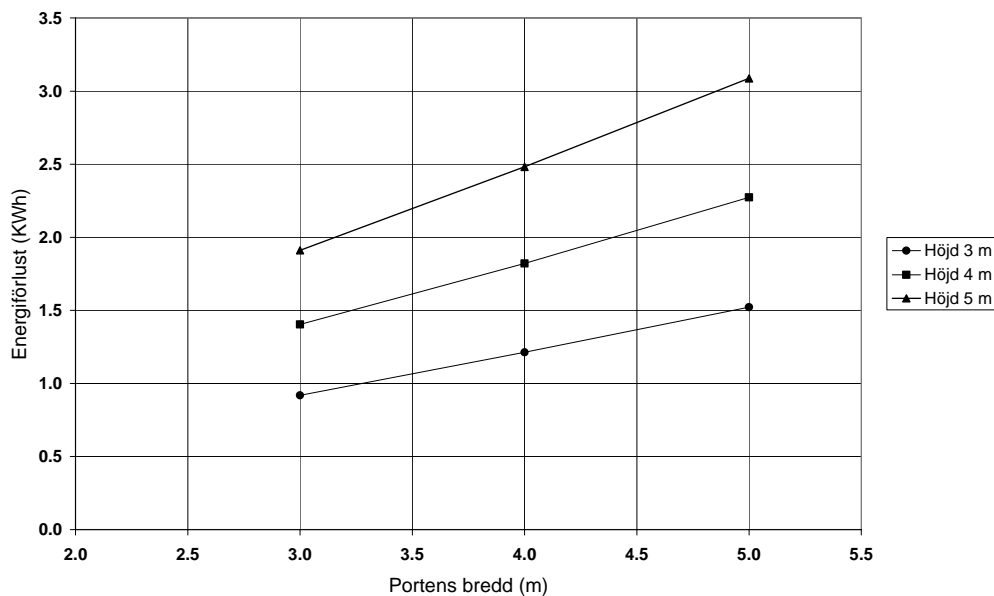
$$E = 0.0012\Delta T^2 + 0.0267\Delta T - 0.0132 \quad [15]$$



Figur 9. Energiförlusten som funktion av temperaturskillnaden

### 5.1.3 Portstorlek

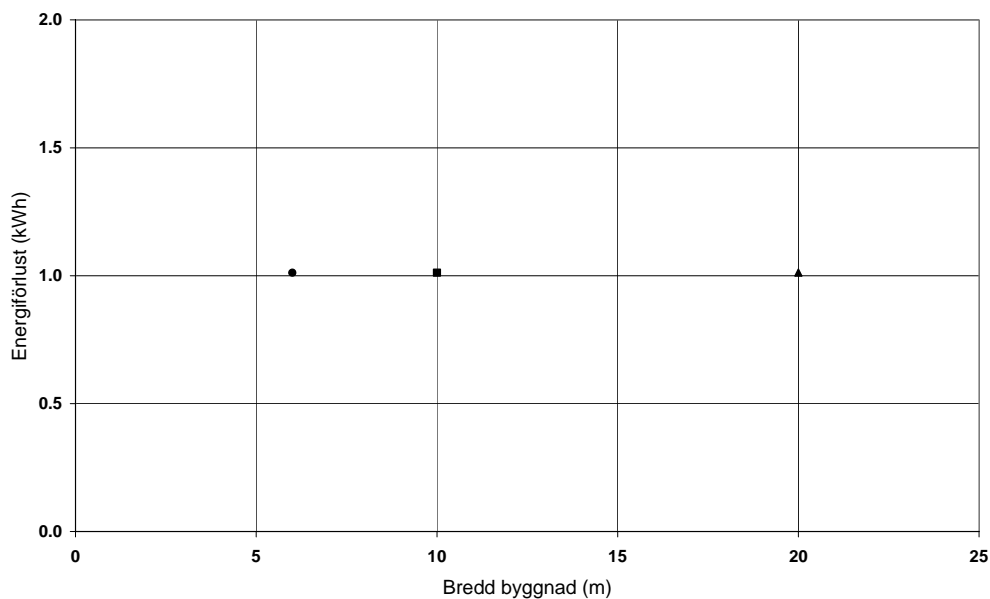
I de tidigare presenterade beräkningarna har byggnadens port samma storlek, 4×4 m. Här följer resultaten för energiförlusten genom en öppen port med olika höjder och bredder på porten vid omgivningstemperaturen 0°C. I Figur 10 visas energiförlusten för olika breddar och höjder på porten. Resultaten visar att energiförlusten ökar då bredden eller höjden på porten ökar, vilket är vad som kan förväntas. Om man jämför två portar med samma totala öppningsarea kan man se att porten med större höjd ger större energiförlust. Detta betyder att höjden har störst inverkan på luftväxlingen genom porten och att vid optimeringen av en luftridås funktion bör man fokusera på portens höjd i första hand.



Figur 10. Energiförlusten som funktion av portens storlek

### 5.1.4 Byggnadsbredd

För att undersöka om byggnaden storlek inverkar på energiutbytet genom en port har olika bredder på byggnaden undersökts. Beräkningar genomfördes med porten 4×4 m vid utomhustemperaturen 0°C med byggnadsbreddarna på 6, 10 och 20 m. I Figur 11 redovisas energiförlusten genom porten som funktion av byggnadens bredd. Här kan man se att energiförlusten inte påverkas av bredden på byggnaden. Däremot kommer temperaturen i de olika byggnaderna att variera efter de 30 sekunderna som porten varit öppen. Man kommer att få en betydligt lägre temperatur i den minsta byggnaden än i den största. Denna skillnad i temperatur motsvarar dock den skillnad man har mellan de olika byggnadernas volym. Detta ger att den mängd energi som byggnaden har förlorat, och som då måste tillföras för att uppnå samma temperatur som vid starten, blir den samma oavsett storleken på byggnaden.



Figur 11. Energiförlusten genom porten som funktion av byggnadens bredd

### 5.1.5 Vindlast

Här följer resultaten från beräkningarna med en vindlast som låg på rakt emot porten med en vindhastighet på 5 m/s 12 m över marken. Detta genomfördes för porten 4×4 m vid omgivningstemperaturen -20°C. Energiförlusterna blev 1.84 kWh med vindlast och 2.98 kWh utan vindpåverkan. Detta ger en minskning med 38 % av energiförlusterna genom porten då en vindlast ligger på mot porten. Anledningen till att energiförlusten minskar då vinden ligger på mot porten är att den förhindrar luften från byggnaden att tränga ut genom porten genom att den plym som stiger upp ovanför porten med den varma luften från byggnaden hindras att ta sig ut till omgivningen. På detta sätt skapas ett visst övertryck inne i lokalen som även kommer att motverka att den kallare omgivningsluften tränger in i lokalen. Dessutom har vinden antagits ha en viss profil med lägre hastigheter vid marknivån vilket gör att denna kraft som trycker in luften inte blir större än den som den termiska drivkraften, utan vindlast, ger upphov till.

## 5.2 Port med luftridå

För att motverka och minimera de energiförluster som uppstår för en öppen port har en luftridå installerats i porten. I samtliga fall med en luftridå i öppningen var byggnadens storlek 20×6×10 ( $L_{byggn} \times H_{byggn} \times B_{byggn}$ ) m. Utvärderingen av luftridåns funktion har

genomförts för följande tre portstorlekar: 3×3 m, 4×4 m samt 5×5 m för att undersöka vilken inverkan portens storlek har på luftridåns möjlighet att förhindra luftväxlingen genom porten. I samtliga fall har luftridåns längd varit lika stor som portens bredd medan luftridåns bredd har varierats för att undersöka dess inverkan. Dessutom har olika inloppshastigheter på luftridån undersökts.

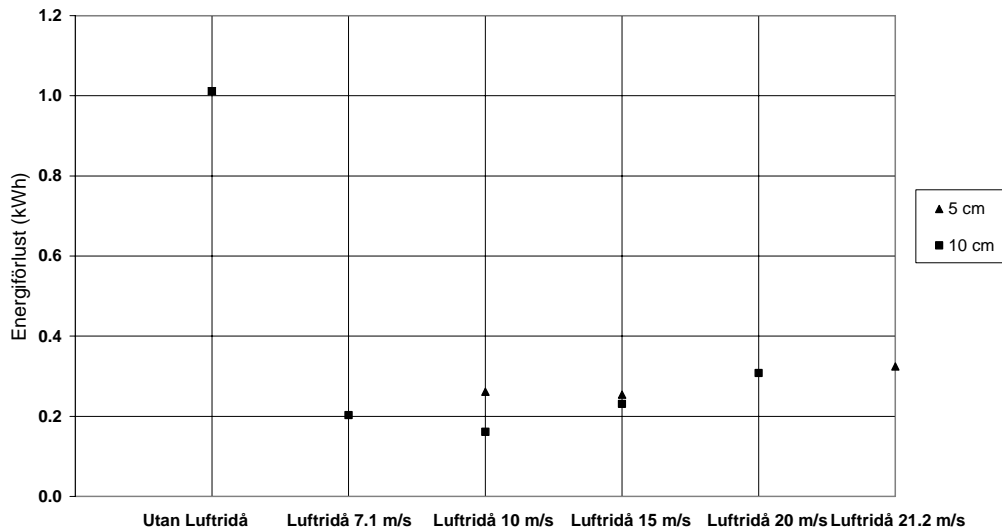
För att bedöma besparingspotentialen för en luftridå ur energisynpunkt behöver luftridåns energianvändning också inkluderas i den totala energianvändningen. Luftridåns energianvändning består av fläktenergi för att generera impulskraften och driva luften samt energi för att värma upp luften till den ansatta inblåsningstemperaturen på 20°C. För beräkning av tillförd energi för fläktdriften har uppgifter hämtats från Frico. Eftersom inte data på tillförd fläktenergi finns tillgänglig för samtliga storlekar och luftflöden som har använts i denna studie har generella värden räknats fram med utgångspunkt från tillgängliga produktdata.

Här i resultatet ha vi valt att fokusera på den mellanstora porten, 4×4 m, eftersom denna storlek är en normalstorlek på en industriport. Resultaten från de övriga portstorlekarna redovisas i den fullständiga sammanställningen av randvillkor och resultat i bilaga 2 där samtliga portar återfinns.

### **5.2.1 Bredden och inloppshastighetens inverkan**

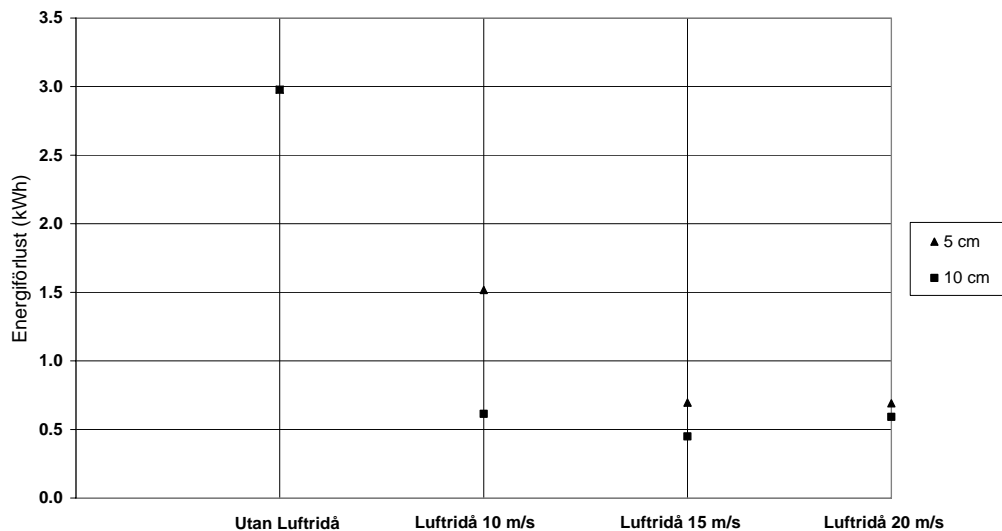
Beroende på portens storlek har olika bredder på luftridån testats. För portstorlekarna 3×3 m och 4×4 m användes bredderna 5 och 10 cm på luftridån medan för den största porten användes bredderna 10 och 15 cm. Dessutom varierades luftridåns inloppshastighet. Figur 12 och 13 redovisas den totala energin som förloras vid omgivningstemperaturen 0 respektive -20°C. I denna energiförlust ingår den energi för luftridån som åtgår för fläktdriften och uppvärmningen av den tillförda luften från luftridån.

I Figur 12 kan man tydligt se att energiförlusten sjunker markant då man installerar en luftridå i porten redan vid den lägsta hastigheten. Vidare kan man se att det finns en brytpunkt då luftridån ger en minimal energiförlust där luftridån är som effektivast. Om inloppshastigheten ökas ger det inte en bättre funktion för luftridån utan istället ökar energiförlusten. Denna optimala hastighet beror på bredden på luftridån och blir olika för den 5 respektive 10 cm breda luftridån. Den 5 cm breda luftridån har en optimerad hastighet på cirka 15 m/s medan den 10 cm breda ridån har en optimal hastighet på ungefär 10 m/s.



Figur 12. Energiförluster för porten 4×4 m vid 0°C utomhustemperatur

Om man istället tittar på luftridåns funktion vid -20°C, se Figur 13, så förändras luftridåns karakteristik jämfört vid 0°C. Dess effektivitet blir inte alls lika bra vid låga hastigheter som vid de lägre termiska drivkrafterna. Den 10 cm breda ridån har nu sin mest effektiva inloppshastighet på cirka 15 m/s medan den smala ridån har ungefär samma effektivitet vid 15 som 20 m/s, vilket tyder på att dess optimala hastighet ligger mellan 15 och 20 m/s.

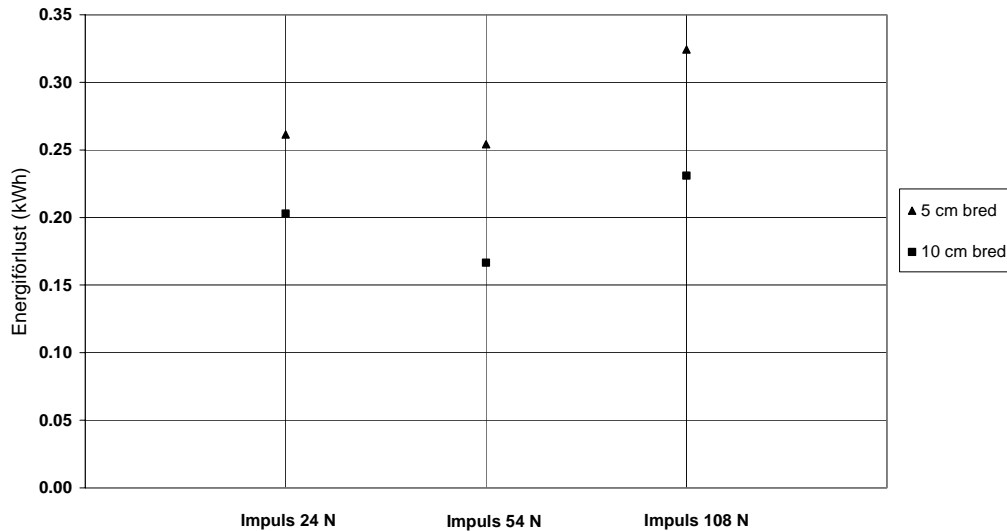


Figur 13. Energiförluster för porten 4×4 vid -20°C utomhustemperatur

## 5.2.2 Impulskraftens inverkan

För att tydligare klargöra hur impulskraften för en luftridå påverkar dess funktion har ett antal fall undersökts. För att analysera hur impulskraften inverkar på luftridåns funktion har tre olika impulskrafter utvärderats. Detta har genomförts för porten 4×4 m med två

olika bredder på luftridån vid omgivningstemperaturen 0°C. För en viss impuls kraft får den smalare luftridån en högre hastighet än den bredare luftridån för att erhålla samma impuls kraft.

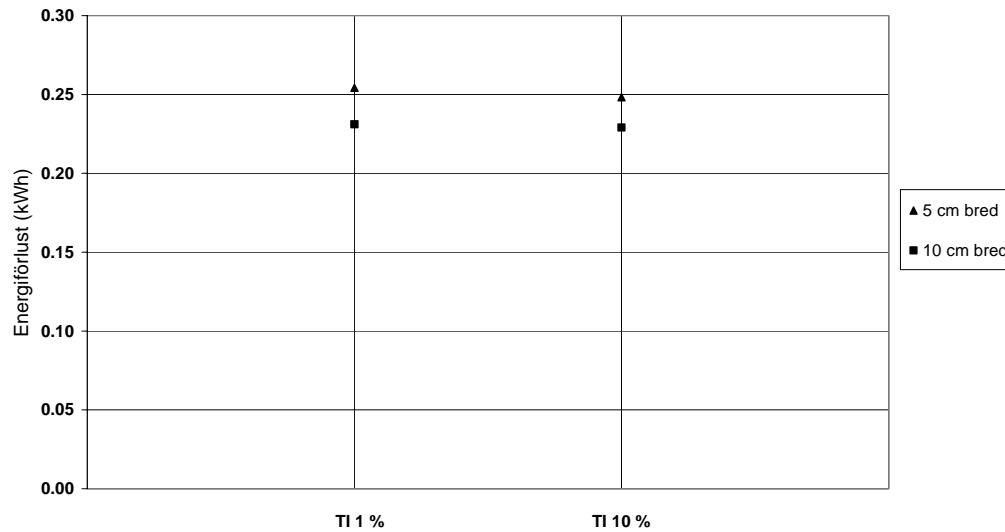


Figur 14. Energiförluster för porten 4×4 med olika impuls krafter på luftridån

I Figur 14 kan man se att vid en impuls kraft på 54 N blir energiförlusterna som lägst för båda luftridåbredderna. Vidare kan man även se att den bredare luftridån är betydligt effektivare än den smala vid samma impuls. En bred luftridå har alltså en bättre skyddande effekt och förmåga att motverka den kalla luften att tränga in genom porten. Samma slutsats har bland annat Hayes och Stoecker (1969b) kommit fram till med sina mätningar.

### 5.2.3 Turbulensintensitetens inverkan

Studien av Howell med flera (1976) har visat att luftridåns turbulensintensitet (TI) vid inloppet kan få en stor inverkan på värmetransporten genom luftridån. Där en ökande TI ger upphov till en större värmetransport genom luftridån. Därför har vi utvärderat vad som händer med luftridåns funktion om turbulensintensiteten höjs från den ursprungliga på 1 % till 10 %. Detta har gjorts med två olika inloppshastigheter (10 och 15 m/s) och med de två olika bredderna 5 och 10 cm på luftridån.

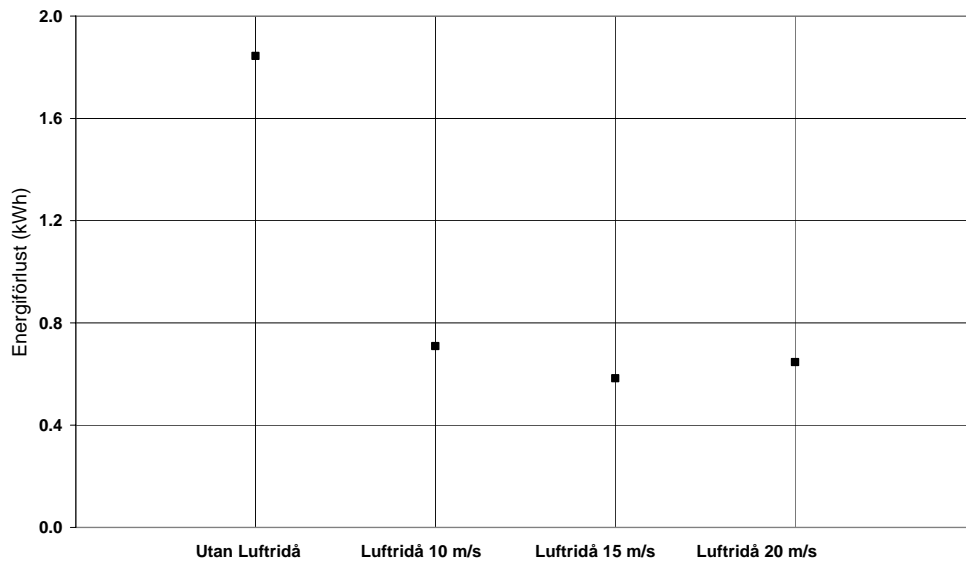


Figur 15. Energiförluster för porten 4×4 med inloppshastigheten 10 m/s och olika TI

I Figur 15 kan man se att energiförlusten genom porten endast påverkas i en mycket liten grad. Det gäller för båda bredderna på luftridån och samma resultat framkom även för luftridån med en inloppshastighet på 15 m/s.

#### 5.2.4 Vindpåverkan på luftridån

Här följer resultaten från beräkningarna med en vindlast som låg på rakt emot luftridån med en vindhastighet på 5 m/s 12 m över marken, se Figur 4. Omgivningens temperatur var  $-20^{\circ}\text{C}$  och luftridåns inloppshastighet var 10, 15 och 20 m/s med bredden 10 cm. I Figur 16 visas energiförlusterna för en 4×4 m port med de olika hastigheterna på luftridån. Här kan man se att en luftridå kraftigt reducerar energiförlusterna genom porten. Även vid vindlast mot porten finns det en optimal hastighet på luftridå, det vill säga den högsta hastigheten ger inte det bästa skyddet mot den kalla luften. För detta fall, med en omgivningstemperatur på  $-20^{\circ}\text{C}$  och för portstorleken 4×4m, var 15 m/s den optimala hastigheten men den kan variera beroende på förutsättningar i omgivningen och själva porten.



Figur 16. Energiförluster för porten 4×4 m med vindlast vid utomhustemperaturen -20°C

### 5.3 Utvärdering luftridå

Genom att jämföra energiförlusten utan luftridå med den förlusten som uppstår med en luftridå kan man bedöma luftridåns besparingspotential ur energisynpunkt. För portstorleken 4×4 m gör man en energibesparing för den 5 cm breda luftridån på 68-75 procent och för den 10 cm breda ridån erhålls en besparing på 70-84 procent. Detta blir alltså den totala energibesparingen som en luftridå kan ge eftersom luftridåns energianvändning är inkluderad i dessa värden. Mätningar utförda av Hetsroni visar att värmeöverföringen genom porten minskar med 60 till 85 procent med en luftridå i öppningen vilket stämmer mycket väl överens med det resultat som framkommit i denna studie.

För att bedöma vilken potential en luftridå har sett över ett helt år följer en jämförelse för ett antal olika driftsfall. Uppgifter avseende användningstid, öppningstid, antal passager med mera har bland annat hämtats från Tekniktävlingen på industriportar som Statens Energimyndighet anordnade 1995. Vad gäller årsmedeltemperaturer har 0 och 10°C använts som ytterlighetsfall. Där 0°C motsvarar medeltemperaturen i nordligaste delarna av Sverige och 10°C de allra sydligaste delarna. Tilläggas bör att inga simuleringar med luftridån i porten har genomförts vid 10° varvid det föreligger viss osäkerhet för dessa värden. För 10°C har energiförlusterna tagits fram utifrån de kurvor som har plottats för de andra temperaturerna. Jämförelsen följer för mellanporten 4×4 m eftersom denna port motsvarar standardstorleken på en industriport. Hastigheten på luftridån var 10 respektive 15 m/s medan bredden var 10 cm för samtliga fall.

#### Grundförutsättningar:

Byggnadsstorlek ( $L \times H \times B$ ):	20×6×10
Antal veckor per år i drift:	50 veckor
Antal dagar/vecka i drift:	5 dagar
Användning per dag:	8 timmar
Antal passager per timme:	4 styck
Öppningstid per passage:	30 sekunder
Total öppettid per år = $50 \times 5 \times 8 \times 4 \times 30 / 3600 \Rightarrow$	67 timmar



Tabell 1. Energiförluster i kWh på årsbasis för en 4×4 m port

	Utan ridå	Ridå 10 m/s	Besparing	Ridå 15 m/s	Besparing
0°C	8136	1294	6842	1857	6279
10°C	2782	386	2414	917	1865

I Tabell 1 kan man se de årliga besparingar man kan göra genom att använda en luftridå vid porten. För denna ridåbredd och portstorlek kan man se att den största besparingen åstadkoms då hastigheten på ridån är 10 m/s. Dessa besparingar utgår från medelvärdet på utomhustemperaturen. För att dimensionera en luftridå behöver man utgå från en betydligt lägre dimensionerande utomhustemperatur för att ridån ska klara av de större drivkrafterna som då blir fallet.

## 6 Diskussion

Vid en första jämförelsen mellan CFD och den ursprungliga modellen i Simulink erhöles relativt stora skillnader avseende luftutbytet genom porten. Genom att korrigera öppningskoefficienten i Simulink blev det en bra överensstämmelse mellan dessa två olika metoder. De värdena på öppningskoefficienten som togs fram med hjälp av CFD hade bra överensstämmelse vid jämförelsen med mätningarna från tidigare genomförda studier. Dessa värden på koefficienten ska sedan kunna användas och implementeras i Simulink och liknande energisimuleringsprogram vid beräkning på strömning genom stora öppningar.

En luftridas funktion beror bland annat på höjden på öppningen, bredden på luftridan och dess inloppshastighet. En luftrida har naturligt svårare att skydda en större och högre port varvid dess hastighet och bredd måste optimeras. För varje portstorlek finns det en optimal inloppshastighet och bredd som ger minsta möjliga energiförluster genom öppningen. Impulskraften är den parameter som bör användas vid dimensioneringen av luftridan eftersom att det är kombinationen mellan bredden och hastigheten som avgör vilken hastighet som är luftridans optimala. Dessutom bör luftridan vara utrustad med en effektiv reglering och styrning som kan anpassa sin drift efter rådande tryckförhållanden över porten. En luftrida kan relativt enkelt dimensioneras för att vara effektiv vid vissa förhållanden men det gäller samtidigt att den har en bra funktion under hela året. Detta kan bestå av att luftridan till exempel inte blåser in mer luft än nödvändigt och då skapar onödigt drag samtidigt som energianvändandet i lokalen ökar.

Turbulensintensiteten visade sig inte ha någon inverkan på luftridans funktion avseende energiförlusterna genom porten. I studien av Howell med flera (1976) fick man fram att turbulensintensiteten (TI) kraftigt ökade värmetransporten genom porten då TI ökades. Detta kan bero på att in den studien hade man betydligt lägre inloppshastigheter (3-5 m/s). För dessa hastigheter får TI en större inverkan på strömningen och hur jetstrålen breder ut sig. Dessutom avtar hastigheten betydligt snabbare då TI ökas.

Potentialen med luftridan ökar vid ett mer frekvent användande och betalar då igen sig på en kortare tid. Vid bedömningen av luftridans potential användes de förutsättningar som togs fram i Statens Energimyndighets tekniktävling på industriportar 1995. Detta motsvarade en total öppningstid på cirka 16 minuter per dag vilket känns som en relativt låg utnyttjandegrad. Om denna öppningstid ökar gör man en större energibesparing på årsbasis och således minskar avbetalningstiden för luftridan. I denna studie har inga investeringskostnader för luftridan inkluderats varför en fullständig ekonomisk utvärdering inte har kunnat genomföras.

Fokus i denna studie har varit att undersöka energiförlusterna genom industriportar och luftridans funktion. Därför har vi vid utvärderingen inte tagit någon hänsyn till de eventuella dragproblem som uppstår nära porten samt den termiska komforten i lokalen. Generellt kan man dock säga att en luftrida skapar ett bättre termiskt klimat, och då även minskade energiförluster, men samtidigt genereras högre lufthastigheter i lokalen som kan leda till dragproblem. Om man tittar på mellanporten 4x4 m så blir lufthastigheten vid golvet cirka 1 m/s utan luftridan medan med luftridan blir hastigheten 3-5 m/s beroende på vilken inloppshastighet som luftridan har. Om man ser till vilken temperatur som det blir inne i lokalen så varierar den beroende på utomhustemperaturen. Vid en omgivningstemperatur på 0°C blir lokalens temperatur 17.5°C utan luftrida respektive 19.7°C medan då temperaturen är -20°C blir lokalens temperatur 12.6°C respektive 18.6-19°C med luftrida i porten. Det man kan se är då att även om det blir högre hastigheter inne i lokalen kommer temperaturen på luften vara betydligt högre med luftridan eftersom

att lufttidåns inblåsningstemperatur är 20°C, vilket bidrar till att besvären på grund av draget minskar.

## 7 Slutsatser

Här följer en sammanställning av de slutsatser som har gjorts i projektet. Först redovisas de slutsatser som gjorts på den oskyddade porten då ingen luftridå var placerad i porten. Vid dessa simuleringar genomfördes en utvärdering av energiförlusterna genom porten beroende på olika parametrar. Därefter följer de slutsatser som gjordes för porten med en luftridå installerad. Här gjordes en utvärdering av funktionen hos luftridån avseende olika parametrar i randvillkoren i omgivningen samt hos luftridån i sig.

Följande slutsatser har gjorts för oskyddade portar:

- God överensstämmelse erhöles mellan CFD beräkningarna och Simulink då korrigera värden på öppningskoefficienten användes. Innan koefficienten var korrigerad var det dock skillnader på cirka 40 procent mellan CFD beräkningarna och Simulink.
- Överensstämmelsen för de framtagna värdena på öppningskoefficienten var god jämfört med mätningar från tidigare genomförda studier.
- Storleken på porten påverkar energiförlusterna genom porten. Höjden har den största inverkan på energiförlusterna och bör därför användas vid optimering av luftridåers funktion.
- Byggnadens storlek påverkade inte energiförlusten genom porten. Detta klargjordes genom att göra simuleringar vid olika bredder på lokalen.
- Vindlast med en lufthastighet på 5 m/s minskar energiutbytet genom en oskyddad port. Vindlaster med en högre hastigheter och med en fluktuerande karaktär bör därför undersökas i kommande projekt.

Här följer de slutsatser som har gjorts för portar med en luftridå:

- För varje portstorlek finns det en optimal inloppshastighet för varje bredd på ridån. Beräkningarna visade att det i regel inte är den högsta inloppshastigheten hos luftridån som ger de lägsta energiförlusterna utan hastigheten för varje specifikt fall måste optimeras.
- För två luftridåer med samma impuls kraft men med olika förhållande mellan bredd och inloppshastighet är den breda luftridån effektivast. Detta stämmer väl överens med resultat från tidigare genomförda studier på luftridåer.
- För de inloppshastigheter på luftridåerna som utvärderades påverkade inte höjningen av turbulensintensiteten vid inloppet från 1 till 10 % energiförlusterna. Denna observation skiljer sig från en del av de resultat från tidigare studier som visar att turbulensintensiteten har en stor inverkan. Fortsatt utvärdering av denna parameter är därför nödvändig i kommande projekt.
- Med en korrekt installerad och dimensionerad luftridå kan man göra energi-besparingar på upp till 85 %. För att uppnå denna besparing gäller det dock att man har en luftridå med en effektiv reglering och styrning som kan anpassa sin drift efter rådande förutsättningar.

## 8 Framtida arbete

Fortsatt arbete för att optimera luftridåns funktion är nödvändigt. I fortsatt studier är det viktigt att beakta följande parametrars inverkan på luftridåns funktion:

- Ventilationen i lokalen bör inkluderas. Denna påverkar bland annat tryckuppsättningen i lokalen som i sin tur kan försämra en luftridåns funktion betydligt. Om det till exempel bildas ett undertryck på grund av ett större frånluftsflöde i lokalen kan luftridån sugas inåt varvid dess skyddande effekt radikalt minskar.
- Vindens inverkan på luftridåns funktion bör ytterligare undersökas. I denna studie användes en jämn vindprofil med en högsta hastighet på 5 m/s. Faktorer som bör utvärderas är en höjning av hastigheten på vindlasten men är fluktuerande egenskaper kan ytterligare skapa effekter som luftridån måste kunna ta hand om. Dessutom bör även vindprofilens utseende undersökas om huruvida den påverkar utbytet genom porten.
- Utformningen på luftridåns inlopp bör studeras. Beroende på vilken inloppsprofil som genereras vid inloppet kan luftridåns funktion komma att ändras. För att genomföra denna utvärdering är det av största vikt att mätningar kan genomföras på en luftridå för att generera randvillkor till simuleringarna. Ytterligare undersökning av hur turbulensintensiteten vid inloppet påverkar luftridåns funktion kan också vara intressant att undersöka.
- Hur effektiva styrningar har egentligen dagens luftridåer? För att man ska uppnå en luftridå med bra funktion över hela året är det nödvändigt att ridån har en effektiv reglering som anpassar sig till de inre och yttre förutsättningar som råder i och runt en industrilokal. Genom att tryckuppsättningen inne i lokalen och i omgivningen hela tiden förändras så måste även luftridån till exempel justera sina flöden för att bibehålla sin funktion. Därför är det viktigt att säkerställa att luftridåerna har ett regelsystem som optimerar deras drift.

## 9 Referenser

Allard, F. och Utsumi, Y. (1992) Airflow through large openings. *Energy and Buildings*, 18: 133-145.

Axell (2002) *Vertical display cabinets in supermarkets –Energy efficiency and the influence of air flows*, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Chen, Q. (1995) Comparison of different k- $\epsilon$  models for indoor air flow computation. *Numerical Heat Transfer, Part B*, 28: 353-368.

Davidson, L. and Karlsson, A. (1988) *Fluid: Ett datorprogram för två-dimensionell turbulent strömning*. Publication no. 88/6, Department of Applied Thermodynamics and Fluid Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg.

Etheridge, D. and Sandberg, M. (1996) *Building and Ventilation: Theory and Measurements*, John and Wiley & Sons, Chichester, UK.

Fritzsche, C. och Lilienblum, W. (1968) New measurements for the determination of the cold losses at the doors of cold rooms. *Kaltetechnik-Klimatisierung 20*, Jahrgang Heft 9.

Goodfellow, H. och Tähti, E. (Eds) (2001) *Industrial Ventilation: Design Guidebook*. Academic Press, USA.

Hayes, F. C. och Stoecker, W. F. (1969 a) Heat transfer characteristics of the air curtain. *ASHRAE Transactions*, no. 2120: 153-167.

Hayes, F. C. och Stoecker, W. F. (1969 b) Design data for air curtains. *ASHRAE Transactions*, no. 2121: 168-180.

Hejazi-Hashemi, M. G. och Sirén, K. E. (1997) A field study of cold airflows through doorways of industrial buildings. *5<sup>th</sup> International Symposium on Ventilation for Contaminant Control*, Ottawa, Ontario, Canada.

Hetsroni, G. och Hall, C. W. (1963) Heat transfer of an air curtain. *Transactions of the ASAE* no. 6(4): 328-334.

Hetsroni, G., Hall, C. W. och Dhanak, A. M. (1964) Further studies of the air curtain. *Quarter Bull. Michigan Agric. Experim. Sta.*, vol 46, no. 3: 438-452.

Howell, R. H., Van, N. Q. och Smith, C. E. (1976) Heat and moisture transfer through turbulent recirculated plane air curtains. *ASHRAE Transactions*, vol. 82, Part 1, no. 2414: 191-205.

Howell, R. H. och Shiabata, M. (1980) Optimum heat transfer through turbulent recirculated plane air curtains. *ASHRAE Transactions*, vol. 86, Part 1, no. 2567: 188-200.

Li, K. och The, S. L. (1996) Two-dimensional numerical study of airflow through large openings. *Indoor Air '96*, Nagoya, Japan.

Nielsen, A. och Olsen, E. (1993) Measurements of air change and energy loss with large open outer doors. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Symposium on Building Physics in the Nordic Countries: Building Physics '93*, Lyngby, Denmark.

Schaelin, A., van der Maas, J. och Moser, A. (1992) Simulation of airflow through large openings in buildings. *ASHRAE Transactions*, 98(2): 319-328.

Tang, D. (1998) CFD Modelling and experimental validation of airflow between spaces. *ROOMVENT '98*, Stockholm.

Törnström, T. (2003) *Numerical predicitions and measurements of non-isothermal airflows*. Lic thesis, Division of Energy Systems, Linköping University, Linköping, Sweden.

Van, N. Q. och Howell, R. H. (1983) Influence of initial turbulence intensity on the developement of plane air curtains. *ASHRAE Transactions*, vol. 82, no. 2121: 208-228.

Wilson, D. J. och Kiel, D. E. (1990) Gravity-driven counterflow through an open door in a sealed room. *Building and Environment*, 25(4): 379-388.

Yakhot, V. and Orszag, S. A. (1986) Renormalization group analysis of turbulence. *Journal of Scientific Computation* 1: 3-51.

**Bilaga 1.** Randvillkor och resultat för beräkningsfallen utan luftrida

	Bredd byggn	Höjd	Bredd	Mesh	Ute temp	Temp byggn	Energiförl	Årlig förlust
	(m)	(m)	(m)	(nr)	(°C)	(°C)	(kWh)	(kWh)
case 1	10	4	4	1	0	290.46	1.02	8161
case 2	10	4	4	1	0	290.47	1.01	8150
case 3	10	4	4	1	0	290.47	1.01	8126
case 4	10	4	4	1	0	290.48	1.01	8110
case 5	10	4	4	1	0	290.46	1.02	8175
case 6	10	4	4	2	0	290.46	1.02	8168
case 7	10	4	4	3	0	290.45	1.02	8215
case 9	10	4	4	5	0	290.48	1.01	8102
case 10	10	4	4	6	0	290.47	1.01	8137
case 11	10	4	4	7	0	290.54	0.98	7901
case 13	10	4	4	9	0	290.47	1.01	8142
case 12	10	4	4	8	0	290.47	1.01	8133
case 14	10	4	4	8	10	292.13	0.35	2784
case 15	10	4	4	8	-10	288.26	1.90	15237
case 16	10	4	4	8	-20	285.56	2.98	23939
case 17	6	4	4	10	0	288.78	1.01	8135
case 18	20	4	4	11	0	291.73	1.01	8141
case 19	10	3	3	12	0	291.74	0.50	4044
case 20	10	3	4	13	0	291.36	0.66	5288
case 21	10	3	5	14	0	290.91	0.83	6712
case 22	10	4	3	15	0	291.09	0.76	6144
case 23	10	4	5	16	0	289.84	1.27	10176
case 24	10	5	3	17	0	290.31	1.08	8654
case 25	10	5	4	18	0	289.50	1.40	11256
case 26	10	5	5	19	0	288.60	1.76	14165
case 49	10	3	3	12	-20	289.26	1.49	12013
case 50	10	5	5	19	-20	279.98	5.21	41860
case 59	10	4	4	22	-20	288.39	1.84	14828
case 12_30s	10	4	4	8	0	290.47	1.01	8134
case 12_60s	10	4	4	8	0	287.99	2.00	16103
case 12_90s	10	4	4	8	0	286.22	2.71	21809
case 12_120s	10	4	4	8	0	284.67	3.33	26804

Här motsvarar case1-5 olika längd på tidsstegen, case 6-13 olika storlek på omgivningen, case 14-16 olika utetemperatur, case 17-18 olika byggnadsbredder, case 19-26 olika storlek på porten och case 59 vindpåverkan på porten.



## Bilaga 2. Randvillkor och resultat för beräkningsfallen med luftridå

	Portstorlek (m)	Bredd ridå (m)	Längd ridå (m)	Ute temp (°C)	Luftridå hast (m/s)	Flöde ridå m <sup>3</sup> /h	Impuls (N)
case 27	3x3	10	3	0	5	5400	9.0
case 28	5x5	10	5	0	5	9000	15.0
case 29	5x5	10	5	-20	5	9000	15.0
case 30	3x3	10	3	-20	5	5400	9.0
case 31	3x3	10	3	-20	10	10800	36.0
case 32	5x5	10	5	-20	10	18000	60.0
case 33	5x5	10	5	0	10	18000	60.0
case 34	3x3	10	3	0	10	10800	36.0
case 35	5x5	10	5	-20	15	27000	135.0
case 36	3x3	10	3	-20	15	16200	81.0
case 37	5x5	10	5	0	15	27000	135.0
case 38	3x3	10	3	0	15	16200	81.0
case 39	5x5	10	5	0	20	36000	240.0
case 40	5x5	10	5	-20	20	36000	240.0
case 41	3x3	5	3	0	10	5400	18.0
case 42	3x3	5	3	0	15	8100	40.5
case 43	5x5	15	5	0	15	40500	202.5
case 44	3x3	5	3	-20	15	8100	40.5
case 45	5x5	15	5	0	20	54000	360.0
case 46	3x3	5	3	-20	10	5400	18.0
case 47	5x5	15	5	-20	20	54000	360.0
case 48	5x5	15	5	-20	15	40500	202.5
case 51	4x4	10	4	-20	10	14400	48.0
case 52	4x4	10	4	-20	15	21600	108.0
case 53	4x4	5	4	-20	10	7200	24.0
case 54	4x4	5	4	-20	15	10800	54.0
case 55	4x4	5	4	0	10	7200	24.0
case 56	4x4	5	4	0	15	10800	54.0
case 57	4x4	10	4	0	10	14400	48.0
case 58	4x4	10	4	0	15	21600	108.0
case 60	4x4	10	4	-20	10	14400	48.0
case 61	4x4	10	4	-20	15	21600	108.0
case 72	4x4	10	4	-20	20	28800	192.0
case 62	4x4	5	4	0	21.21	15271	108.0
case 63	4x4	10	4	0	7.07	10181	24.0
case 64	4x4	10	4	0	20	28800	192.0
case 65	4x4	10	4	0	10.61	15278	54.0
case 66	4x4	5	4	0	10	7200	24.0
case 67	4x4	5	4	0	15	10800	54.0
case 68	4x4	10	4	0	10	14400	48.0
case 69	4x4	10	4	0	15	21600	108.0
case 70	4x4	5	4	-20	20	14400	96.0
case 71	4x4	10	4	-20	20	28800	192.0
case 57_0	4x4	10	4	0	10	14400	48.0
case 57_30	4x4	10	4	0	10	14400	48.0
case 57_60	4x4	10	4	0	10	14400	48.0
case 57_90	4x4	10	4	0	10	14400	48.0
case 57_120	4x4	10	4	0	10	14400	48.0

Här motsvarar case 27-48, 51-58, 64 och 70, 71 luftridå med olika randvillkor, case 60, 61 och 72 vindpåverkan, case 62,63 och 65 fall för utvärderingen av luftridåns impuls-kraft och case 66-69 fall med en turbulensintensitet på 10 %.

## Bilaga 2. Randvillkor och resultat för beräkningsfallen med luftridå

	Besparing	T byggn	Energiförlust	Fläkt	Värme	Total energi	Årlig förlust
	(%)	(°C)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)	(kWh)
case 27	77	292.74	0.105	0.009	0.002	0.117	938
case 28	40	290.49	1.003	0.016	0.031	1.050	8440
case 29	29	284.12	3.551	0.016	0.111	3.678	29571
case 30	48	291.12	0.754	0.009	0.014	0.778	6252
case 31	89	292.66	0.138	0.019	0.005	0.162	1300
case 32	62	288.47	1.813	0.032	0.113	1.958	15742
case 33	79	292.22	0.310	0.032	0.019	0.361	2904
case 34	84	292.85	0.060	0.019	0.002	0.081	649
case 35	82	290.91	0.837	0.047	0.079	0.963	7743
case 36	86	292.58	0.170	0.028	0.010	0.208	1670
case 37	77	292.18	0.328	0.047	0.031	0.407	3268
case 38	77	292.79	0.083	0.028	0.005	0.116	930
case 39	70	291.96	0.415	0.063	0.052	0.529	4256
case 40	80	290.83	0.868	0.063	0.108	1.039	8355
case 41	79	292.76	0.094	0.009	0.002	0.106	848
case 42	73	292.71	0.118	0.014	0.003	0.135	1086
case 43	80	292.37	0.252	0.071	0.035	0.358	2879
case 44	82	292.37	0.251	0.014	0.007	0.272	2190
case 45	73	292.21	0.314	0.095	0.059	0.468	3760
case 46	77	292.17	0.332	0.009	0.006	0.348	2798
case 47	83	291.30	0.681	0.095	0.128	0.903	7259
case 48	86	291.58	0.567	0.071	0.080	0.718	5772
case 51	79	291.60	0.561	0.025	0.028	0.614	4935
case 52	85	292.04	0.383	0.038	0.029	0.449	3612
case 53	49	289.33	1.468	0.013	0.037	1.517	12197
case 54	77	291.37	0.652	0.019	0.024	0.696	5595
case 55	74	292.39	0.243	0.013	0.006	0.261	2102
case 56	75	292.43	0.227	0.019	0.009	0.254	2044
case 57	84	292.68	0.129	0.025	0.006	0.161	1294
case 58	77	292.55	0.180	0.038	0.013	0.231	1858
case 60	62	291.37	0.652	0.025	0.033	0.709	5703
case 61	68	291.73	0.508	0.038	0.038	0.583	4691
case 72	65	291.64	0.542	0.050	0.054	0.647	5202
case 62	68	292.29	0.283	0.027	0.015	0.324	2607
case 63	80	292.55	0.179	0.018	0.006	0.203	1632
case 64	70	292.41	0.234	0.050	0.023	0.308	2477
case 65	84	292.67	0.133	0.027	0.007	0.167	1339
case 66	74	292.38	0.247	0.013	0.006	0.266	2137
case 67	75	292.45	0.221	0.019	0.008	0.248	1996
case 68	83	292.66	0.137	0.025	0.007	0.169	1358
case 69	77	292.56	0.178	0.038	0.013	0.229	1842
case 70	77	291.41	0.634	0.025	0.032	0.691	5559
case 71	80	291.77	0.492	0.050	0.049	0.591	4755
case 57_0	0	293.00	0.000	0.025	0.000	0.025	203
case 57_30	84	292.68	0.129	0.025	0.006	0.161	1294
case 57_60	86	292.41	0.237	0.025	0.012	0.274	2203
case 57_90	86	292.14	0.344	0.025	0.017	0.386	3106
case 57_120	85	291.87	0.451	0.025	0.023	0.499	4010

Här motsvarar case 27-48, 51-58, 64 och 70, 71 luftridå med olika randvillkor, case 60, 61 och 72 vindpåverkan, case 62,63 och 65 fall för utvärderingen av luftridåns impuls-kraft, case 66-69 fall med turbulensintensiteten 10 %. Besparingen i andra kolumnen motsvarar den energibesparing man gör genom att använda en luftridå i porten istället för att ha porten helt oskyddad.