

# Luftrörelser i spalt

Experimentell verifiering av teoretisk modell



LUNDS  
UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Byggnadsmaterial

Examensarbete:  
Jens Persson  
Johan Rudolfsson

© Copyright Jens Persson, Johan Rudolfsson  
LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Lunds universitet  
Box 882  
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering  
Lund University  
Box 882  
SE-251 08 Helsingborg  
Sweden

Tryckt i Sverige  
Media-Tryck  
Biblioteksdirektionen  
Lunds universitet  
Lund 2009

## Sammanfattning

Genom experimentella mätningar har vi tagit fram grafer för luftflöden och förlustfaktorer i spalt mellan vind- och regnskydd i putsade tvåstegstätade fasader. Detta är av betydelse för att veta att inträngande fukt kan torka ut så att konstruktionen inte tar skada. Mätningar gäller för konstruktioner med spaltbildande läkt från Lindab och Europrofil samt även för fallet med helt tom spalt. Resultaten har sedan jämförts med en teoretisk beräkningsmodell för luftflödena. Arbetet innehåller även jämförelser mellan beräknade och uppmätta förlustfaktorer för varje engångsmotstånd som finns i spalten. Mätningarna är utförda inomhus vid en temperatur av ca 20°C i en för ändamålet specialbyggd rigg.

Nyckelord: Luftflöden, Spalt, Tvåstegstätning, Läkt

## **Abstract**

By experimental measurements we have developed charts for air flows in the space between the wind- and rain cover in parget two-step sealed facade. This is a presumption to give penetrating moisture a possibility to dry-out and the construction not to take damage. All measurements are based on structures with ventilated air space with profiles from Lindab and Europrofile. The results are then compared with a theoretical calculation of air flows. The work also includes comparisons with the calculated and measured loss factors for each disposable resistance air space offers. Measurements are all performed indoors at a temperature of about 20°C in a purpose-built rig.

Keywords: Air flow, Air space, Two-step seal, Spline

## **Förord**

Denna rapport är ett examensarbete skrivet på LTH, Campus Helsingborg. Examensarbete är ett obligatoriskt moment till en högskoleingenjörsexamen inom byggt teknik.

Större delen av arbetet som ligger till grund för rapporten är gjord i LTH forskningslabb avdelning Väg- och Vattenbyggnad i Lund. Under arbetets gång har vi haft stor hjälp av handledare Jörgen Falk och examinator Kenneth Sandin som vi vill rikta ett stort tack till. Vi vill även passa på att nämna Stefan Backe, Bo Johansson och Bengt Nilsson samt övrig personal vid LTH som hjälpt oss under arbetets gång. Tack så mycket!

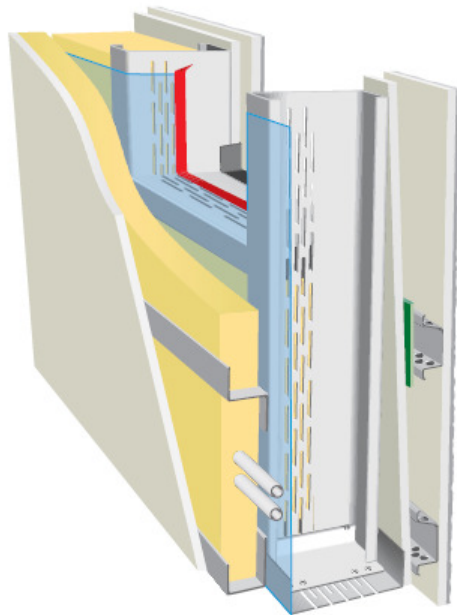
Helsingborg, maj 2009

# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Problemformulering</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Syfte</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Bakgrundsteori</b>	<b>3</b>
<b>3.1</b>	<b>Reynolds tal</b>	<b>3</b>
3.1.1	Laminär strömning	3
3.1.2	Turbulent strömning	3
3.1.3	Hydraulisk diameter	3
<b>3.2</b>	<b>Hastighetsprofil</b>	<b>5</b>
<b>3.3</b>	<b>Luftrörelsens drivkrafter</b>	<b>5</b>
<b>3.4</b>	<b>Friktionsförluster</b>	<b>6</b>
<b>3.5</b>	<b>Engångsförluster</b>	<b>6</b>
<b>3.6</b>	<b>Tryckbalans</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Instrumentering och mätmetoder</b>	<b>7</b>
<b>4.1</b>	<b>Dragprovare</b>	<b>7</b>
<b>4.2</b>	<b>Lufthastighetsmätare</b>	<b>8</b>
<b>4.3</b>	<b>Volymflödesmätning med strypfläns</b>	<b>8</b>
<b>4.4</b>	<b>Tryckskillnadsmätare</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Inledande försök</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>Provuppställning</b>	<b>12</b>
<b>6.1</b>	<b>Spalten</b>	<b>13</b>
<b>6.2</b>	<b>Inlopp</b>	<b>14</b>
<b>6.3</b>	<b>Utlopp</b>	<b>15</b>
<b>6.4</b>	<b>Profiler</b>	<b>15</b>
<b>6.5</b>	<b>Tryckutjämningsboxen</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>Genomförande</b>	<b>17</b>
<b>8</b>	<b>Resultat från mätningar</b>	<b>18</b>
<b>8.1</b>	<b>Mätresultat jämfört med beräkningsmodell</b>	<b>18</b>
8.1.1	Mätresultat baserade på flödesröret	18
8.1.2	Mätresultat baserade på lufthastighetsmätaren	22
<b>8.2</b>	<b>Redovisning av uppmätta förlustfaktorer</b>	<b>26</b>
<b>9</b>	<b>Felkällor</b>	<b>32</b>
<b>10</b>	<b>Slutsats</b>	<b>33</b>
<b>11</b>	<b>Bilagor</b>	<b>34</b>
<b>11.1</b>	<b>Tabell för beräkning av <math>k</math> värde</b>	<b>34</b>
<b>12</b>	<b>Referenser</b>	<b>35</b>

## 1 Problemformulering

Under senare år har det byggts många enstegstätade hus med putsad fasad i stora delar av Sverige. Konstruktionen har visat sig bristfällig och inte alltid helt bekymmersfri ur fukthänseende med kostsamma reparationer som följd. Ett alternativt sätt för att bygga putsade fasader är med s.k. tvåstegstätning. Tekniken innebär att klimatskalet istället utförs i två steg, som innebär att man skapar en luftspalt mellan regnskydd och vindskydd. Detta för att kunna dränera och ventilerar ut slagregn och annan fukt som tränger in i konstruktionen samt att agera tryckutjämnare. Traditionellt skapas luftspalten med stående läkt så att en vertikal, sammanhängande luftspalt utan hinder bildas. I praktiken finns det dock ett flertal olika varianter på läktsystem. En sådan variant kan vara att luftspalten skapas med hjälp av horisontella, perforerade plåtläkt. På dessa läkt monteras skivmaterial av olika typer som putsen anbringas på.



**Fig.1 Bilden illustrerar en möjlig väggkonstruktion med spaltbildande plåtläkt.  
Källa: Europrofil**

## 2 Syfte

Syftet med arbetet är att verifiera överensstämmelsen av luftflöden och förlustfaktorer med en teoretisk beräkningsmodell. Modellen som mätningarna jämförs med har tagits fram av Jörgen Falk, Skanska Teknik . Försöken avser spaltutförande med läkt från Europrofil och Lindab. I arbetet kommer inte den teoretiska modellens beräkningsgång redovisas utan endast i form av grafer då denna modell är allt för omfattande för detta arbete.



## 3 Bakgrundsteori

I detta avsnitt förklaras den teori som vi varit tvungna att fördjupa oss i för att kunna analysera de mätdata som vi tagit fram.

Mycket av teorin gäller för både gaser och vätskor(fluidier) men i detta arbete behandlas enbart luft.

### 3.1 Reynolds tal

Reynolds tal är ett dimensionslöst tal som används för att avgöra om en fluid strömmar laminärt eller turbulent. Med hjälp av storheterna densitet, viskositet, strömningshastighet samt rörets diameter kan detta talet bestämmas. I detta arbete kommer rördiametern ersättas av en spalt vilket förklaras längre ned.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} \quad \text{ekv.1}$$

$\rho$  = densitet [kg/m<sup>3</sup>]

$v$  = hastighet [m/s]

$d$  = diameter [m]

$\eta$  = luftens dynamiska viskositet [Ns/m<sup>2</sup>]

#### 3.1.1 Laminär strömning

Reynolds tal 2300 används som gräns för att avgöra om strömningen är laminär eller turbulent. Lägre tal betyder laminär strömning och högre tal betyder således turbulent strömning. Självklart är inte gränsen så knivskarp utan man räknar med ett visst övergångsområde där ett mellanting mellan tillstånden råder. Reynolds tal <2100 betyder att fluiden strömmar absolut laminärt[5]. Med det menas att all den tillförda energin går åt för att transportera fluiden[2].

#### 3.1.2 Turbulent strömning

Vid Reynolds tal >2300 börjar turbulens infinna sig. Turbulent strömning är virvelrik, orolig och har stor blandningsförmåga vilket ger upphov till stora strömningsförluster. Den undre gränsen för absolut turbulent strömning ligger vid ca Re 4000[5].

#### 3.1.3 Hydraulisk diameter

Då ekvationen för Reynolds tal främst behandlar strömning i cirkulära rör precis som de flesta teoretiska samband inom strömningsläran måste detta

räknas om för vårt arbete. Begreppet hydraulisk diameter  $d_H$  möjliggör omräkning från cirkulära tvärsnitt till rektangulära tvärsnitt och definieras som

$$d_H = \frac{4 \cdot A}{R} \quad \text{ekv.2}$$

$A$  = sektionens tvärsnittsarea [ $\text{m}^2$ ]

$R$  = sektionens perimeter [ $\text{m}$ ]

En cirkel med diametern  $d$  har hydraulisk diameter

$$d_H = \frac{4 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}}{\pi \cdot d} = d$$

För en rektangel med sidorna  $a$  och  $b$  blir sambandet

$$d_H = \frac{4 \cdot a \cdot b}{2(a+b)} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a+b}$$

För en spalt med två parallella ytor på avståndet  $b$  från varandra samtidigt som  $a \gg b$  blir den hydrauliska diametern

$$d_H = 2 \cdot b$$

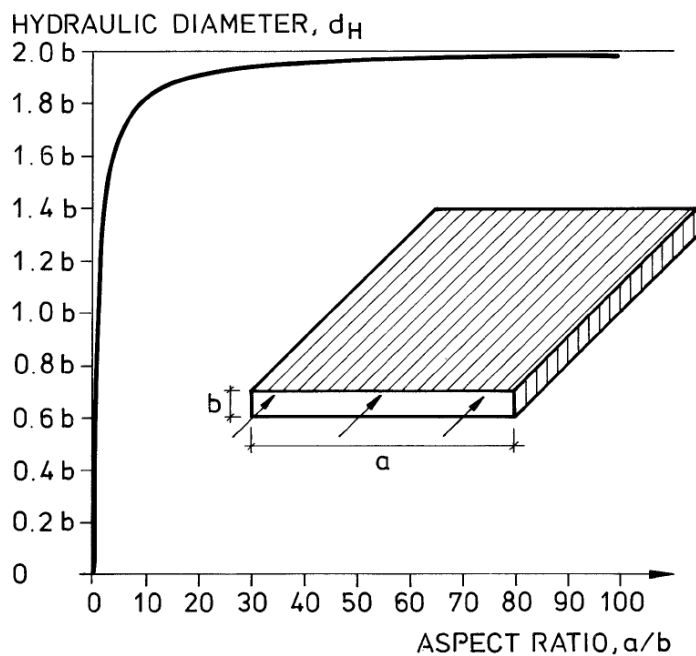


Fig 3.1 Beskriver hydraulisk diameter genom förhållandet  $a/b$  [1]

### 3.2 Hastighetsprofil

Hastighetsprofilen för en laminär luftström mellan två parallella plan ser ut som i figuren nedan[1].

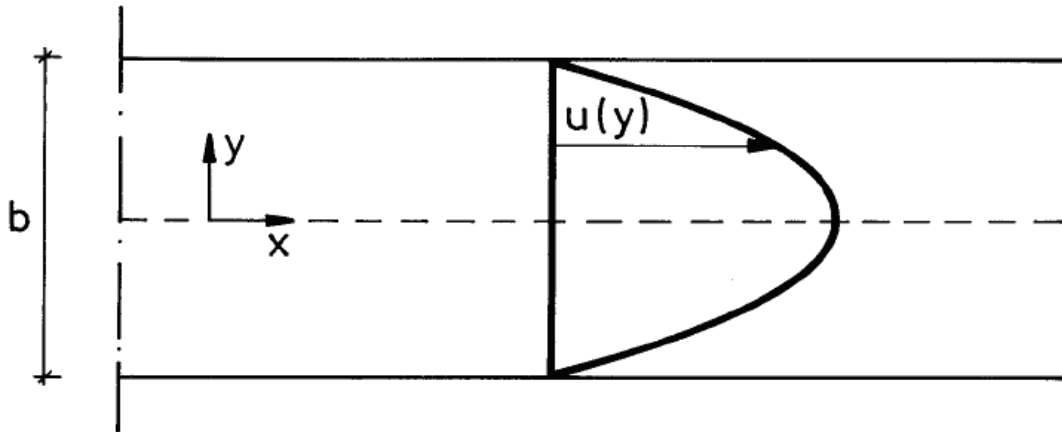


Fig 3.2 Hastighetsprofil för laminär luftström mellan två parallella plan

Högsta hastigheten  $u_{max}$  uppstår mitt emellan de två planen. Medelhastigheten av luftströmmen förhåller sig enligt [1] som

$$u_{medel} = \frac{2}{3} \cdot u_{max} \quad \text{ekv.3}$$

Vid turbulentströmning blir tvärsnittet mer likformigt. Uppgifter om detta har inte hittats i litteraturen men vid turbulent rörströmning och  $Re$  ca 4000 uppges att  $u_m$  är  $0,79u_{max}$ [4].

### 3.3 Luftrörelsens drivkrafter

I försöken har vi använt oss av en fläkt för att skapa ett undertryck i spalten som får luften att röra sig. I verkligheten är det sol, vind som skapar dessa luftrörelser. Luftrörelser frambringade av sol kallas termik och beror på att varm luft har lägre densitet än kall. När den uppvärmda luften i spalten stiger fylls spalten på med ny kallare luft nerifrån som i sin tur blir uppvärmd och rör sig uppåt.

Även vinden skapar luftrörelser när det blåser mot fasaden. På lovartssidan (sidan det blåser mot) skapas ett övertryck som är störst högst upp. På läsidan blir det följaktligen ett undertryck, som även det är störst högst upp. Detta gör att termik och vind både kan med- och motverka varandra och man vet därför inte alltid på vilket håll luftrörelserna kommer att ske[3].

### 3.4 Friktionsförluster

När luften strömmar i spalten kommer tryckförluster uppstå p.g.a. friktion mellan spaltytorna och luften. Denna förlust sker kontinuerligt och ökar därför med spaltens längd.

Tryckförlust per längdenhet på grund av friktion kan beräknas med hjälp av Darcy-Weisbach ekvation

$$\frac{\Delta p}{l} = \frac{\lambda}{d_H} \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad \text{ekv.4}$$

$\Delta p$  = tryckfall [Pa]

$l$  = spaltens längd [m]

$\lambda$  = friktionsfaktor [-]

$d_H$  = hydraulisk diameter [m]

$\rho$  = luftens densitet [kg/m<sup>3</sup>]

$u_m$  = medelhastighet hos luftströmmen [m/s]

Friktionsfaktorn räknas ut olika för laminär och turbulent strömning. Vid laminär strömning gäller att friktionen mot spaltväggarna enbart beror på Reynolds tal och friktionsfaktorn  $\lambda$  kan skrivas

$$\lambda = \frac{96}{\text{Re}}$$

Vid turbulent strömning så är friktionsfaktorn en funktion av Reynolds tal, ytornas skrovlighet och hydraulisk diameter och är svårare att beräkna än i det laminära fallet.

### 3.5 Engångsförluster

Tryckfall uppstår även av engångsförluster. I vårt fall kommer engångsförlusterna av inlopp, läkt och utlopp. Engångsförluster kan delas upp i:

$$\Delta p_{\text{engångsförluster}} = \Delta p_{\text{inlopp}} + \Delta p_{\text{läkt}} + \Delta p_{\text{utlopp}} \quad \text{ekv.5}$$

Tryckförluster genom ett engångsmotstånd beräknas generellt genom nedanstående formeln där  $\xi$  är en dimensionslös förlustfaktor och  $u_m$  är medelhastigheten. I beräkningsmodellen använder sig [4] av olika  $u_m$  beroende på vilket motstånd som förlustfaktorn avser. Vid inlopp är  $u_m$  samma som medelhastigheten i spalten. Vid läkt och utlopp är  $u_m$  medelhastigheten genom

motståndet. För att kunna jämföra våra mätresultat med den teoretiska modellen kommer vi redovisa grafer baserade på samma  $u_m$ .

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \quad \text{ekv.6}$$

$\rho$  = luftens densitet [kg/m<sup>3</sup>]

$u_m$  = aktuell medelhastighet [m/s]

$\xi$  = förlustfaktor [-]

### 3.6 Tryckbalans

Den totala tryckskillnaden mellan spaltens inlopp och utlopp är drivkraften för luftströmmen. Luften rör sig alltid från ett område med högt tryck till ett område med lägre tryck. Luftflödet kommer att bestämmas av att det totala tryckfallet över spalten måste vara lika med summan av de tryckfall som uppstår vid luftens väg från inlopp till utlopp[1].

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{spalt} + \Sigma \Delta p_{engångsförluster} \quad \text{ekv.7}$$

## 4 Instrumentering och mätmetoder

För att ta reda på luftflödet i spalten har tre olika metoder använts. En metod har varit att beräkna luftflödet genom en strypfläns. De andra två metoderna som nyttjats för att beräkna flödet går ut på att mäta lufthastigheten med dragprovare och anemometer. Hastigheten i spalten omvandlas sen till ett flöde. Vid hastighetsmätning antas att det är topphastigheten som mäts och räknas därför om enligt *ekv.3*. Dessa tekniker kommer nedan att beskrivas närmare.

### 4.1 Dragprovare

Dragprovaren är ett glasrör som innehåller ett ämne som vid kontakt med luft bildar en vit rök. Med hjälp av en gummiblåsa kan denna rök ”puffas” ut och sedan följas genom spalten[3].

Tiden det tar för röken att förflytta sig en känd sträcka används för att räkna ut en hastighet och sedermera ett flöde. Detta visade sig emellertid fungera dåligt då röken var svår att följa när lufthastigheten ökades samt när röken passerade läkten. I och med detta så har resultaten från denna inte använts.

## 4.2 Lufthastighetsmätare

I spalten placerades lufthastighetsmätare även kallad anemometer eller varmtrådsgivare. Denna mäter vindhastighet genom ett förhållande mellan temperatur och avkylning.

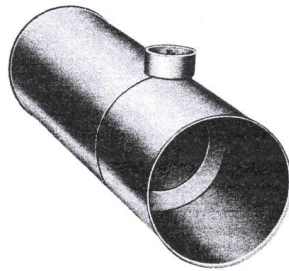
Lufthastighetsmätaren har använts konsekvent genom alla mätningar.



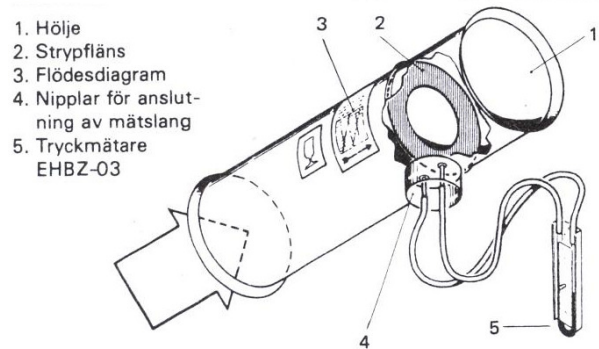
**Fig 3.2** Lufthastighetsmätare

## 4.3 Volymflödesmätning med strypfläns

För att kunna bestämma luftflödet i spalten har vi använt oss av en teknik för att mäta luftflödet genom ett rör. Efter fläkten som användes för att skapa luftflödet monterades ett rör med en strypfläns. Genom att mäta tryckfallet över den flänsen kan flödet genom röret bestämmas och således också medellufthastigheten i spalten. Stor vikt lades vid att tät provuppställningen så att all luft som passerar genom röret kan antas vara av samma volym som den som passerar genom spalten. Mellan rör och fläkt placerades även en strömningsriktare bestående av två tunna plåtskivor som monterades som ett kryss i röret. Denna hade till uppgift att ta bort eventuella luftvirvlar som bildats av fläkten som annars kunnat fördärva mätvärdena.



52761-1



**Fig 4.3 Volymflödesmätare**

För att omvandla tryckskillnadsmätningarna över strypflänsen till ett flöde används följande samband[6].

$$q = k \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad \text{ekv.8}$$

$q$  = volymflöde [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$k$  = dimensionslös koefficient [-]

$d$  = strypflänsens håldiameter [m]

$\rho$  = luftens densitet [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Flödeskoefficienten  $k$  är en funktion av diameterförhållandena mellan röret, hål i strypflänsen och Reynolds tal.  $k$  kan utläsas ur diagram enligt *Bilaga 11.1*. Ingångsvärde är  $\beta$  och  $Re$  i röret.

$$\beta = d/D \quad \text{ekv.9}$$

$d$  = strypflänsens håldiameter [m]

$D$  = Rörets diameter [m]

**Se Bilaga 11.1**

Då Reynolds tal är okänt vid beräkningens start och måste antas, används nedanstående formel för att kontrollera att rätt värde på  $k$  används. Genom iteration samt interpolation får man fram rätt  $k$  faktor.

Beräkningsgång:

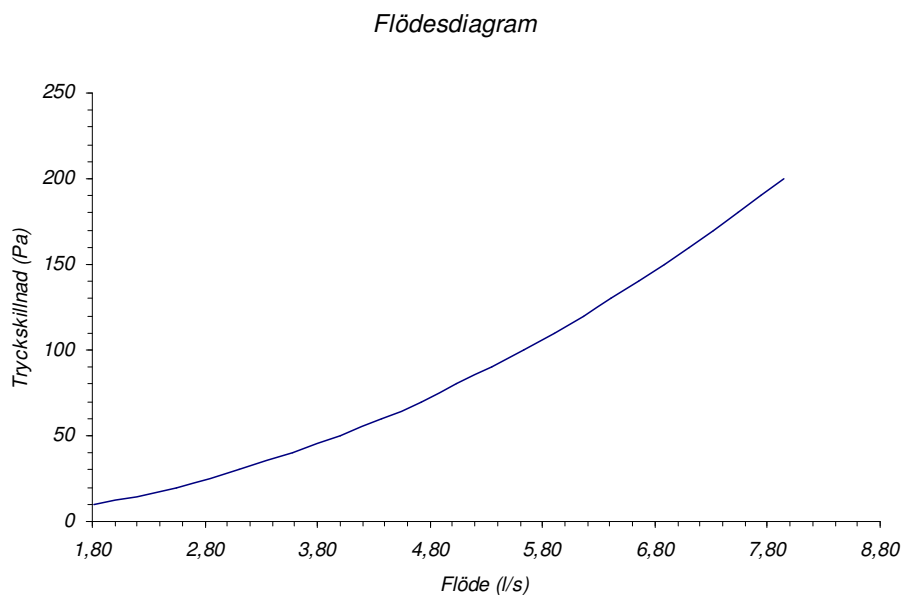
- Räkna ut  $\beta$
- Anta ett Reynolds tal
- Beräkna  $q$
- Dividera  $q$  med tvärsnittsarean och du får  $u_m$
- Kontrollera Reynolds tal genom nedanstående formel
- Interpolera fram ny  $k$  faktor och upprepa beräkningsgången

$$\text{Re} = \frac{u_m \cdot d_H \cdot \rho}{\eta} \quad \text{ekv.10}$$

$u_m$  = medelhastighet [m/s]

$d_H$  = hydraulisk diameter [m]

$\eta$  = luftens dynamiska viskositet [Ns/m<sup>2</sup>]



**Fig.4.4** Beräknade flöden vid olika tryckskillnader för vårt förhållande på  $\beta$



## 4.4 Tryckskillnadsmätare

Till försöken har två olika tryckskillnadsmätare använts. En har behövts för att mäta tryckskillnaden över strypflänsen i flödesmätningarna. Den andra användes för att mäta på provuppställningen. För mätning av tryckdifferenserna över strypskivan behövdes en mätare som klarade av ett stort spektra då skillnaderna var uppemot 180Pa. Mätaren som användes till detta klarade ett intervall upp till 200Pa. För att mäta på provuppställningen användes en tryckskillnadsmätare som klarade en tryckskillnad på 20Pa.



Fig 4.5 Tryckskillnadsmätare

## 5 Inledande försök

Vi har utfört mätningar för att verifiera en teoretisk beräkningsmodell för luftflöden och förlustfaktorer. Innan mätningarna startade utförde vi tester på en redan färdig provvägg för att kunna bygga en för oss optimal provuppställning för kommande mätningar.

Avsikten var att komma fram till vad för typ av fläkt vi skulle behöva för att få tillräckliga tryckskillnader mellan inlopp och utlopp på spalten. Resonemang fördes ifall vi skulle använda fläkten till att suga ut eller blåsa in luft i spalten samt om hur stora tryckskillnader vi ville uppnå.

Antaganden gjordes om att det skulle vara lättare att suga ut luften, alltså skapa ett undertryck för att få ett jämt flöde över hela tvärsnittet och att ca 20 Pa var en fullt tillräcklig tryckskillnad.

Förprovningssväggen utrustades med tre läkt från Europrofil för att se om fläkten hade tillräcklig kapacitet för att uppnå tryckskillnader upp emot 20 Pa. Anledningen till att vi enbart provade läkt från Europrofil var för att vi gjorde ett antagande att dessa skulle göra ett minde motstånd i och med att hålaren är större jämfört med Lindab. Orkade fläkten skapa tillräckliga tryckskillnader för Europrofilen så borde den också fungera för läkt från Lindab.

Den första fläkten som testades var en axialfläkt som vi monterade på förprovningssväggen. Fläktens varvtal kunde vi styra med hjälp av en

spänningskub, men det visade sig snabbt att fläkten inte hade tillräcklig kapacitet då vi fick maximal tryckskillnad på ca 10 Pa.

Efter försöken med axialfläkten kom vi fram till att en kraftigare fläkt behövdes och det blev en något större kanalfläkt som monterades.

Det visade sig att fläkten gav mer än tillräckliga tryckskillnader så vi beslutade att använda oss av den i våra fortsatta mätningar.

Ett mindre problem som uppstått i samband med denna fläkt är att dess motor inte var avsedd att varvtalsregleras och gick därför inte helt jämnt på alla varvtal. Detta kan förklaras med hur motorns spole är lindad men är samtidigt inte relevant för detta arbete och behandlas därför inte mer.

I samband med tryckskillnadsmätningarna gjordes även mätningar med dragprovare för att kontrollera att lufthastighetsmätaren visade korrekta värden. De beräknade värdena med avseende på dragprovaren stämde så pass bra överens med de värden som visades på lufthastighetsmätaren att även den kunde användas i de kommande mätningarna.

## 6 Provuppställning

Provuppställningen som byggts är en modell av hur denna typ av väggkonstruktion kommer att se ut. Spaltens bredd byggdes 450mm bred och dess längd variabel. I det kortaste utförandet är väggens längd 2100mm vilket ungefär motsvarar avståndet mellan överkant resp. underkant mellan två fönster på olika våningsplan. En 2400mm lång förlängning av spalten med möjlighet att dockas på byggdes också. Med denna monterad blev totallängden således 4500mm.

I nederkant på den korta spalten byggdes en stor låda. För att generera ett luftflöde i spalten har en fläkt använts som skapat ett undertryck i lådan.

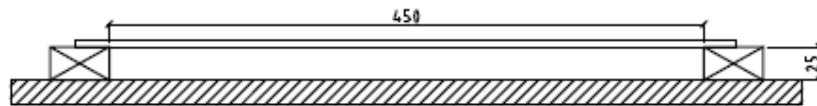


**Fig 6 Bild som illustrerar hela spalten med plåtläkt och tryckutjämningsboxen i nederkant. (datum stämmer ej)**

## **6.1 Spalten**

Väggens bakstycke är byggt av 19mm MDF och motsvarar vindskyddet i en verklig väggkonstruktion. För att skapa luftspalten har 25mm läkt använts och en plexiglasskiva monterades på detta. Stor vikt har lagts vid att få provuppställningen tät så att ingen tjuvluft kunde läcka in och fördärva mätresultaten. Mellan plexiglasskivan och läkten monterades därför en tätningslist. Plexiglasskivan är det som motsvarar skivmaterialet som putsen anbringas på i en verklig väggkonstruktion. Anledningen att vi valde plexiglas som front var att detta gav möjligheten att kunna se in i spalten och observera luftrörelserna med hjälp av rök.

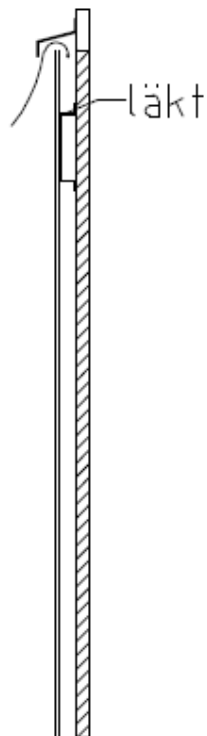
I spalten monterades sedan två olika fabrikat av läkt. Dessa tillsammans med avslutningarna vid inlopp och utlopp står för de s.k. engångsmotstånden och beskrivs nedan.



**Fig 6.1 Spaltens tvärsnittsyta**

## 6.2 Inlopp

Vid spaltens överkant tillverkades två plåtprofiler vars funktion var att efterlikna övre avslutningen på en vägg. De olika storlekarna som användes gav en inloppsarea motsvarande 12 000 mm<sup>2</sup>/m resp. 25 000 mm<sup>2</sup>/m där luften var tvungen att vända 180° för att komma in i spalten.



**Fig 6.2 Inlopp provrigg**

### 6.3 Utlopp

Väggens underkant mynnar ut i lådan. Precis i mynningen monterades en plastprofil vars funktion i verkligheten är att skydda spalten från skadedjur. Detta skydd har en perforering med många små hål och är inte helt olik Europrofil men den totala hålarean är 10300 mm<sup>2</sup>/m.

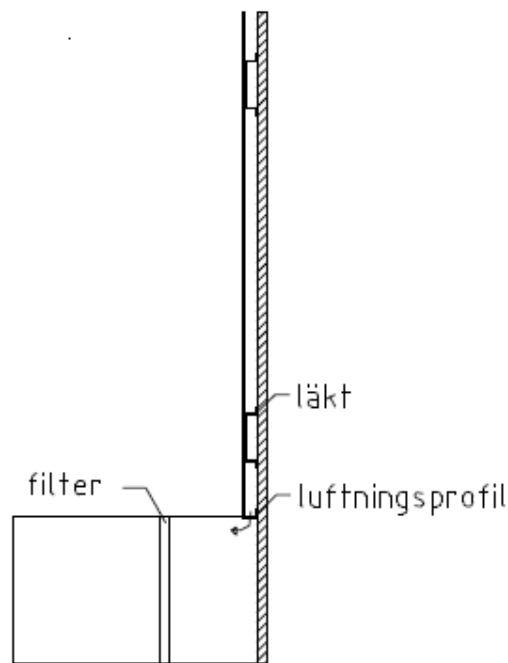
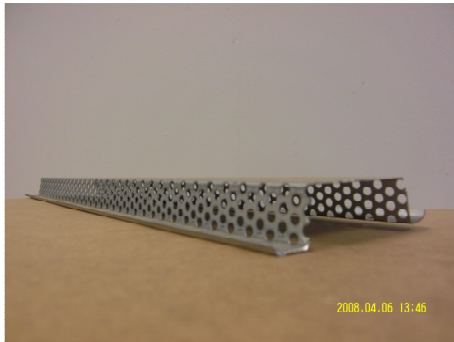


Fig 6.3 Utlopp på provrigg

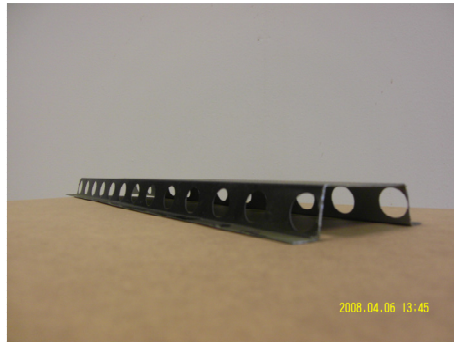
### 6.4 Profiler

Plåtprofilerna som testerna är utförda på är av två fabrikat, Lindab och Europrofil. Båda är framtagna för ändamålet men skiljer sig främst åt genom att de har olika hålperforering. Europrofil har många små hål (Ø5mm) vilket skapar en total hålarea av 9817 mm<sup>2</sup>/m. Lindabs profil har få stora hål vilket skapar en hålarea av 7069 mm<sup>2</sup>/m. Vid mätningarna användes en spalt med

bredden 450mm. För att hålarean på Lindabläktet skulle svara mot angiven hålarea utgick mätningen vid kapning från centrum av mitthålet.



**Fig 6.4 Europrofil**



**Lindab**

## 6.5 Tryckutjämningsboxen

I underkant på provväggen byggdes en låda som fungerat som tryckutjämningsbox. Denna hade till syfte att motverka variationer av flöde på grund av ojämn gång hos fläkten. I boxen monterades dessutom ett filter med stor tröghet för att få ett så jämnt flöde som möjligt över hela spaltens tvärsnittsarea samt skapa ett motstånd för fläkten att jobba emot. En tredje orsak till att boxen byggdes var för att ha något stabilt att montera fläkten mot.



**Fig 6.5 Tryckutjämningsboxen med tillhörande filter**

## 7 Genomförande



**Fig 7 Fläkten med anslutande flödesrör**

Under försöken har provväggen legat horisontellt på golvet för att vara mer lättåtkomlig för mätningar. Då spalten byggdes i två delar så beslutades tidigt att det var lämpligast att ha den liggande i och med att den ståendes sträcker sig 4,5m och hade då blivit svårare att hantera.

Vid mätningarna har vi mätt tryckskillnad över *inlopp*, *läkt* och *utlopp*. Summan av dessa kontrollerades också med en mätning över hela spaltuppställningen.

För alla mätningar användes ett och samma instrument vilket gjorde att slangarna fick flyttas runt mellan mätpunkterna. Detta skapade ett visst merarbete men medför samtidigt att eventuella kalibreringsfel följer med vid alla mätningar.

Tryckskillnader på lämpliga intervall ställdes in med hjälp av varvtalsreglering på fläkten. Vid varje mätpunkt registrerades utöver tryckskillnaderna för varje del också lufthastighet och tryckskillnad för flödesröret. Alla försök är genomförda inomhus vid en temperatur av ca 20°C.

## 8 Resultat från mätningar

Då luften passerar genom spalten kommer tryckförluster uppstå vid inlopp, utlopp, passage av läkt samt p.g.a. friktion utmed spaltväggarna. Storleken på tryckförlusterna beror på hur svåra motstånden är att passera samt vilken hastighet luftströmmen har. Friktionsförlusten som uppstår utmed spaltväggarna är beroende av spaltens längd, Reynolds tal och lufthastigheten och blir således större desto längre spalten är. Denna sortens förlust sker kontinuerligt. *Inlopp*, *utlopp* och *läkt* kallas engångsmotstånd. Som beskrivs tidigare kan man i verkligheten inte alltid förutse åt vilket håll luftens strömning kommer att ske p.g.a. att storleken på vind och termik kommer att variera under både dygn och årstid. I testerna vi genomfört har vi skapat ett undertryck vid väggens nedre del och därför valt att kalla den övre öppningen för *inlopp*. Vid passage av detta motstånd uppstår inte bara en eventuell areaminskning utan luften skall även vända 180°. Vid passage av läkten är det areaförändringen som utgör motståndet då detta tvingar luftströmmen att kontraheras samt öka i hastighet för att bibehålla samma flöde. Motståndet vid *utlopp* kan ses som vid ett läkt då samma fenomen uppstår. För att kunna behandla våra mätdata har vi använt ett antal olika beräkningsmodeller.

### 8.1 Mätresultat jämfört med beräkningsmodell

I diagrammen nedan redovisas sambandet Tryckskillnad - Flöde för olika spaltutföranden samt mätmetoder.

Spaltens utförande förklaras överst i diagrammet. De heldragna graferna som redovisas nedan är en teoretisk beräkningsmodell [4] och de streckade graferna är de mätvärden vi fått vid provning.

Att de streckade graferna är kortare än de teoretiska beror på att fläktens kapacitet inte räckte till vid spaltutföranden med små motstånd.

#### 8.1.1 Mätresultat baserade på flödesröret

Flödet kurvorna redovisar är framtagna från mätningar med flödesröret och beräknade med hjälp av *ekv. 8*, *ekv. 9*.



Diagram 1-2 visar uppmätta flöden (streckad linje) jämfört med beräkningsmodell (heldragen linje) för 4500mm spalt, 8st läkt, luftningsprofil och 12mm resp. 25mm inlopp.

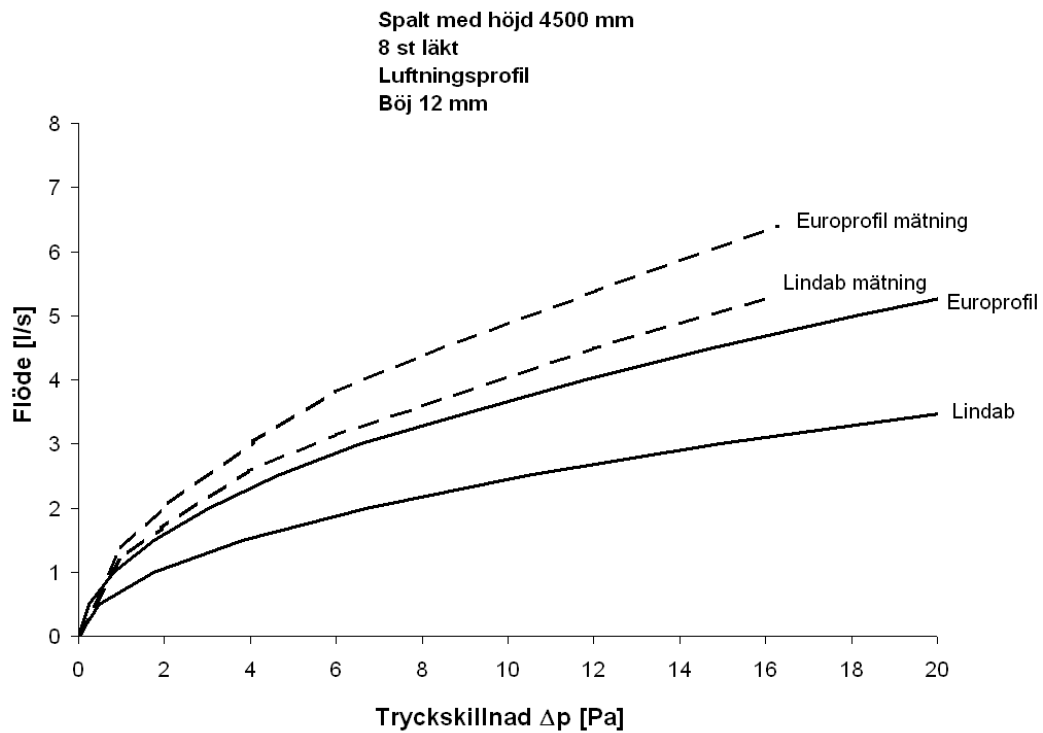


Diagram 1

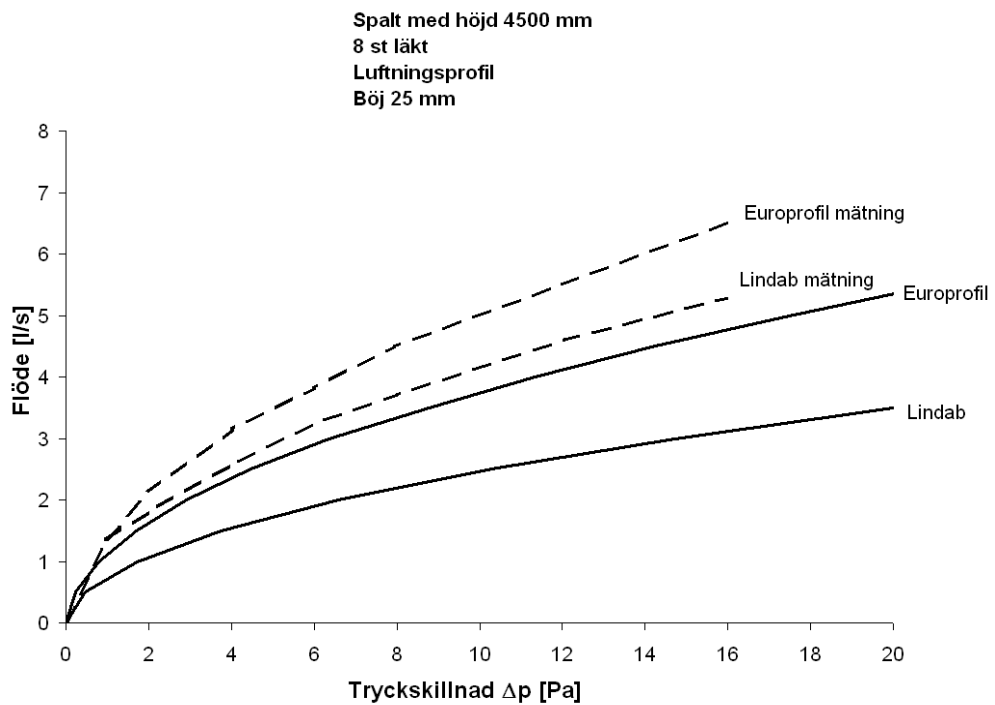


Diagram 2

Diagram 3-4 visar uppmätta flöden (streckad linje) jämfört med beräkningsmodell (heldragen linje) för 2100mm spalt, 4st läkt, luftningsprofil och 12mm resp. 25mm inlopp.

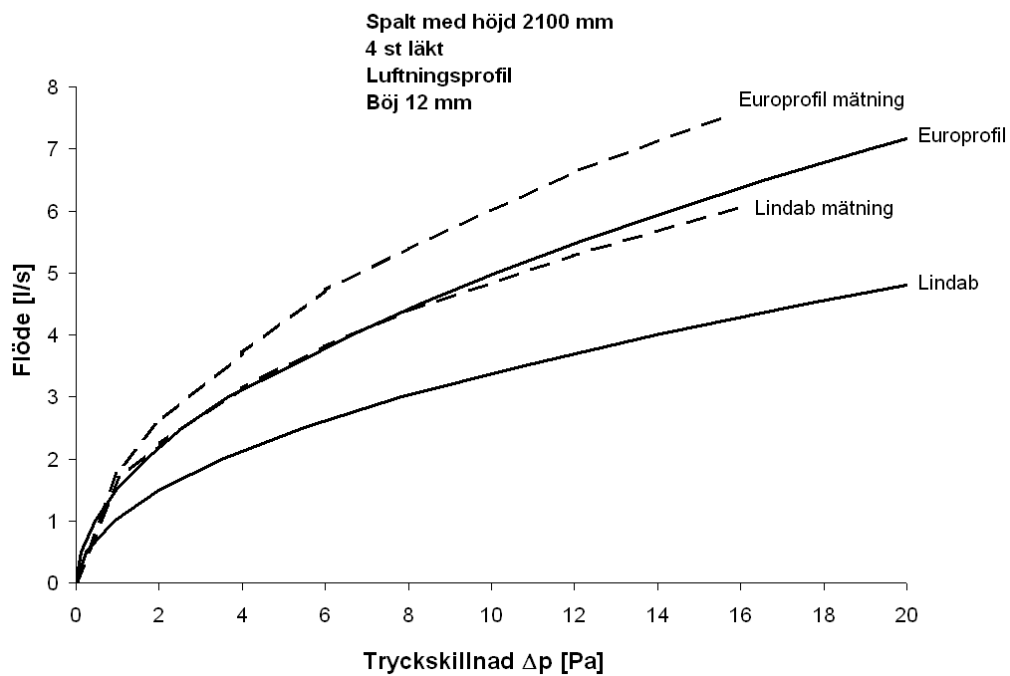


Diagram 3

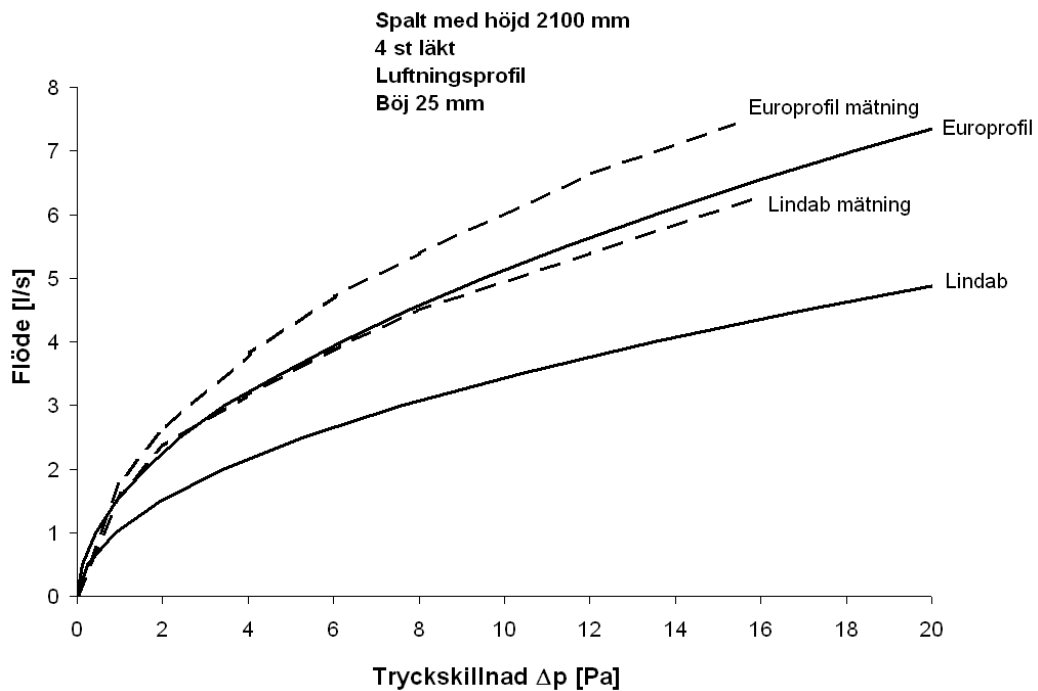


Diagram 4

Diagram 5-6 visar uppmätta flöden (streckad linje) jämfört med beräkningsmodell (heldragen linje) för 2100mm spalt, 1st läkt, luftningsprofil och 12mm resp. 25mm inlopp.

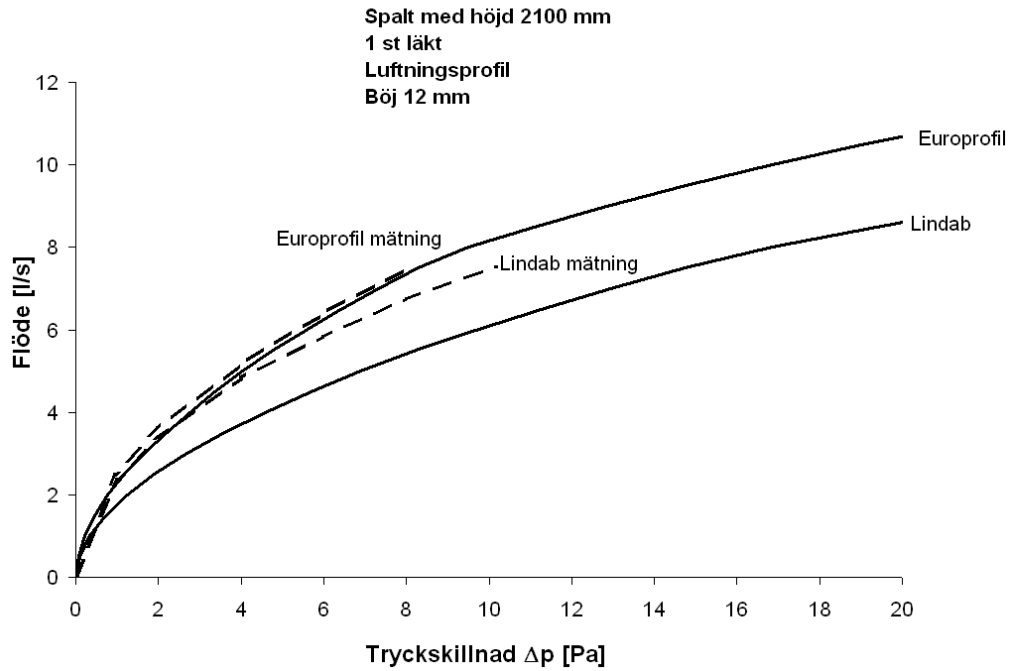


Diagram 5

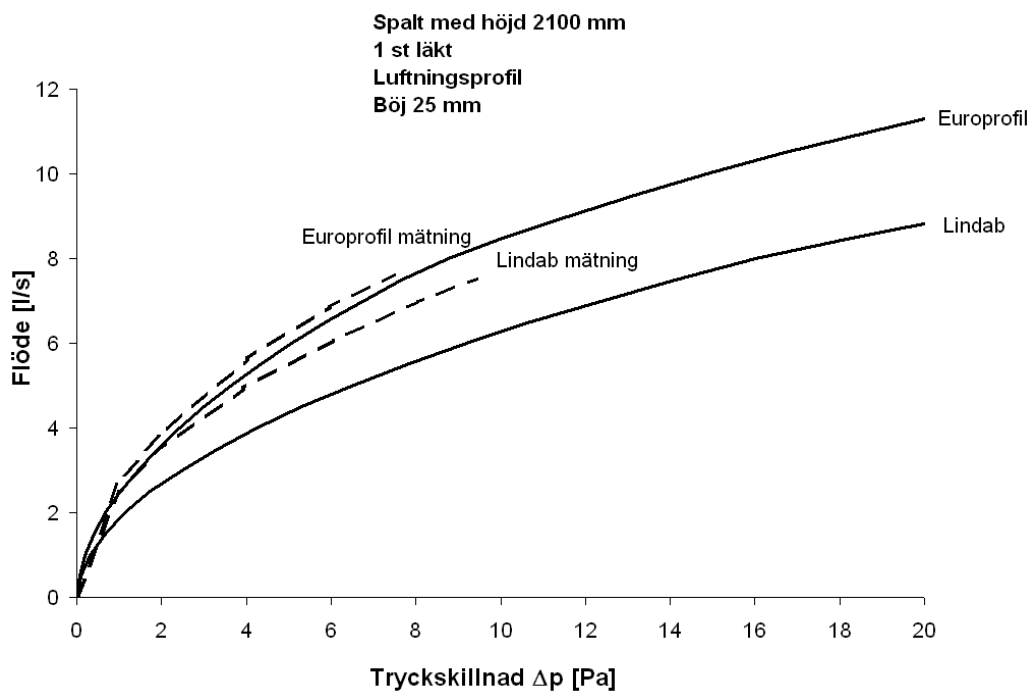


Diagram 6

Diagram 7 visar uppmätta flöden (streckad linje) jämfört med beräkningsmodell (heldragen linje) för 4500mm spalt, utan läkt, luftningsprofil och böj vid inlopp.

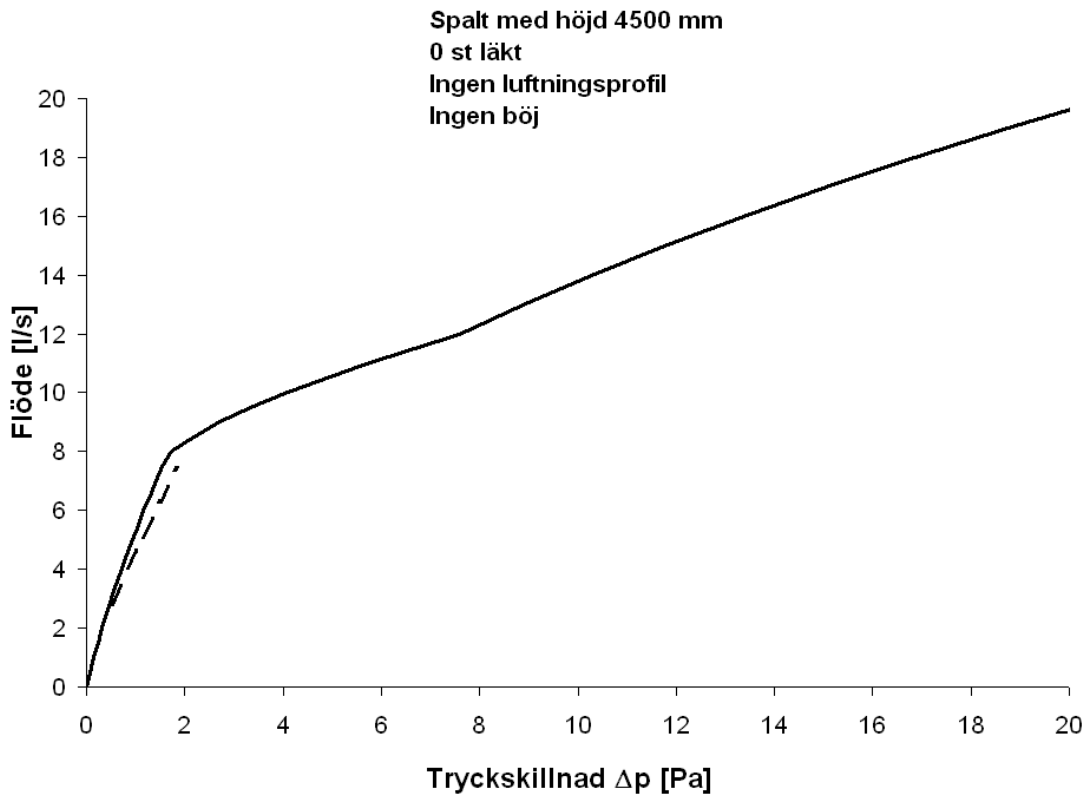
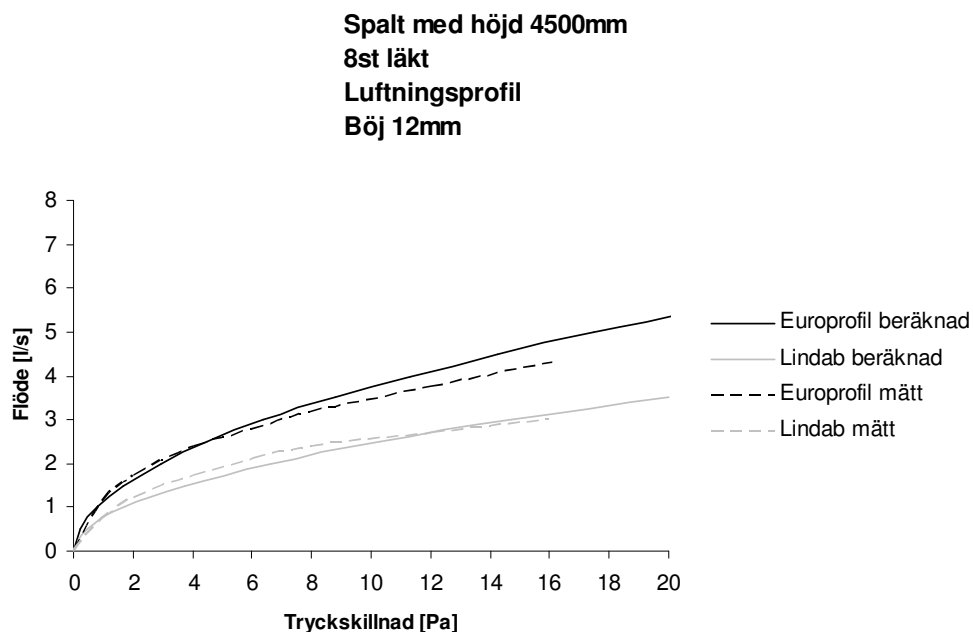


Diagram 7

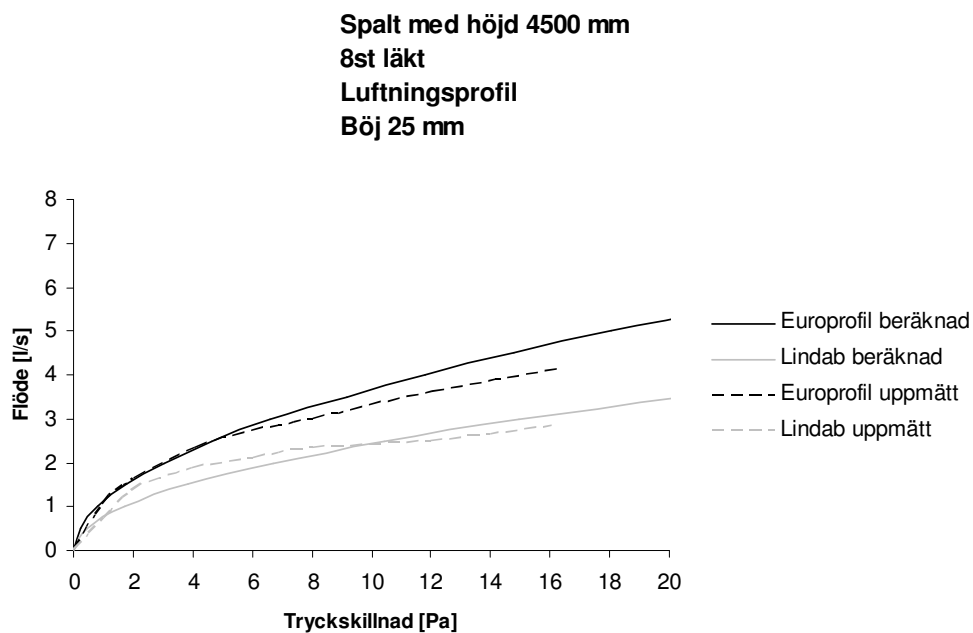
### 8.1.2 Mätresultat baserade på lufthastighetsmätaren

Redovisat volymflöde är baserat på avläsning av uppmätt vindhastighet på anemometern. Flödet är en omräkning med antagen vindhastighetsprofil för spalten (ekv.3).

Diagram 8-9 visar uppmätta flöden (streckad linje) jämfört med beräkningsmodell (heldragen linje) för 4500mm spalt, 8st läkt, luftningsprofil och 12mm resp. 25mm inlopp.

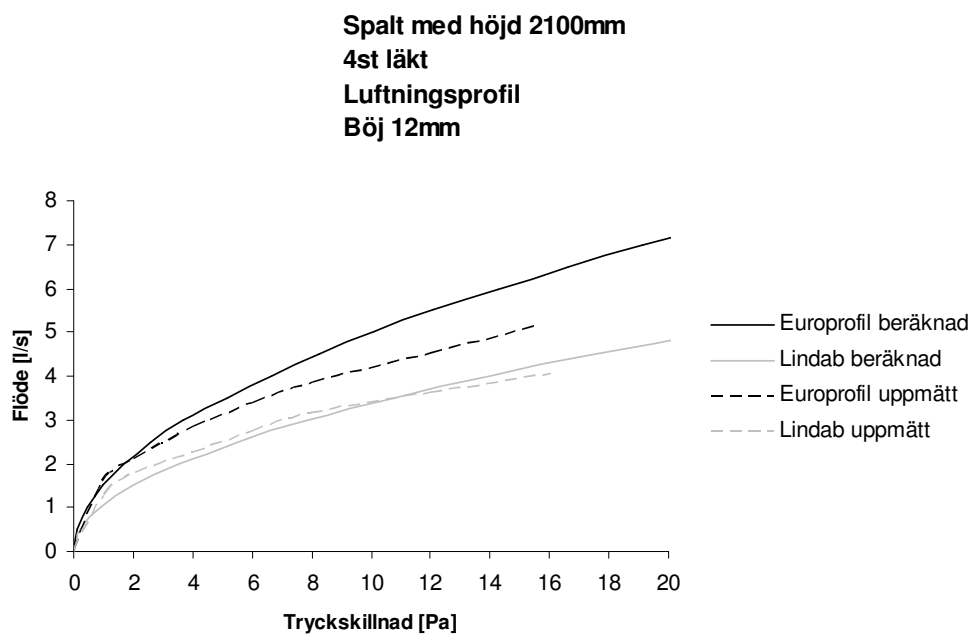


**Diagram 8**

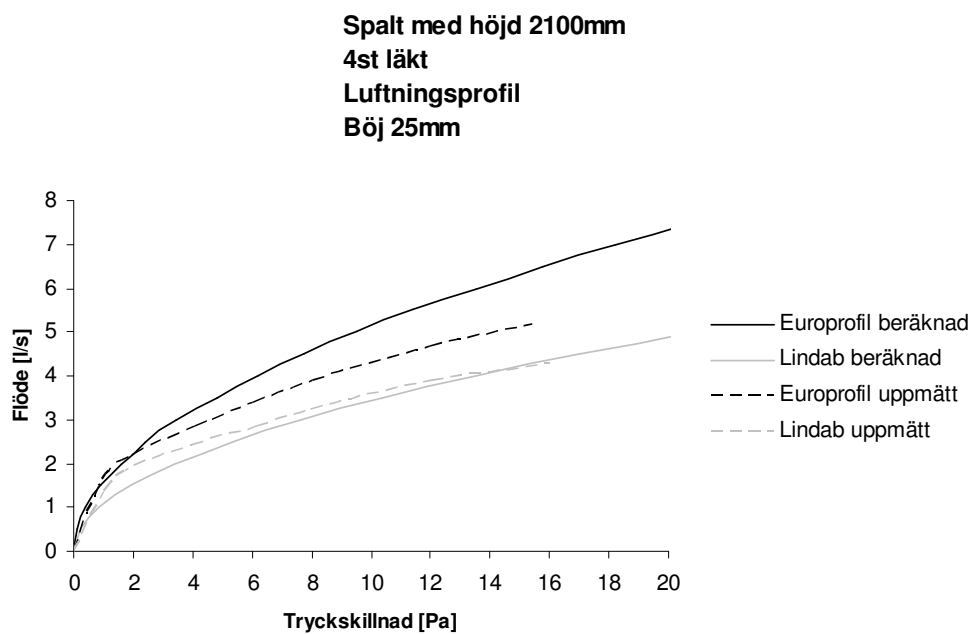


**Diagram 9**

Diagram 10-11 visar uppmätta flöden (streckad linje) jämfört med beräkningsmodell (heldragen linje) för 2100mm spalt, 4st läkt, luftningsprofil och 12mm resp. 25mm inlopp.

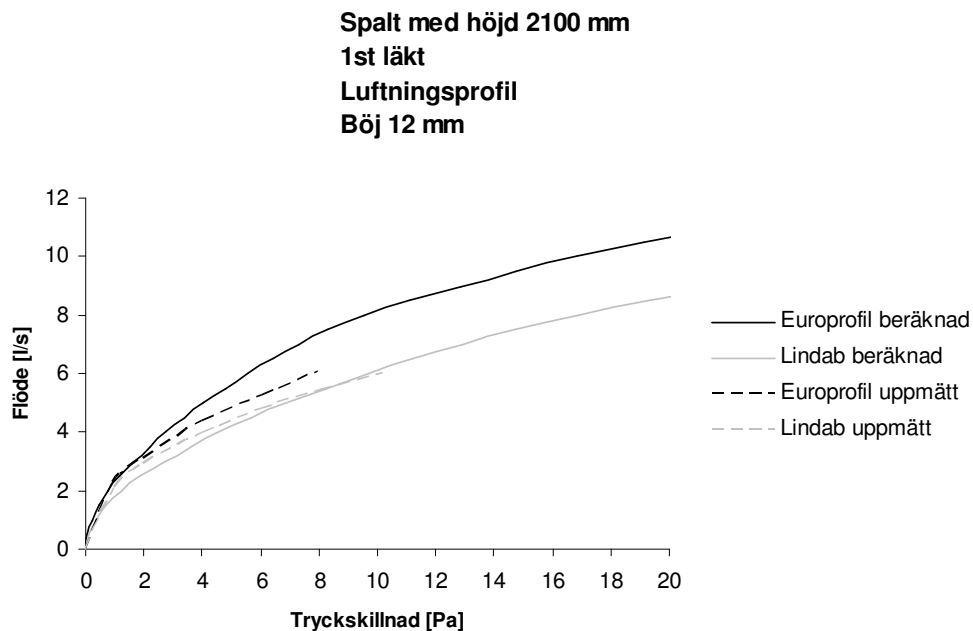


**Diagram 10**

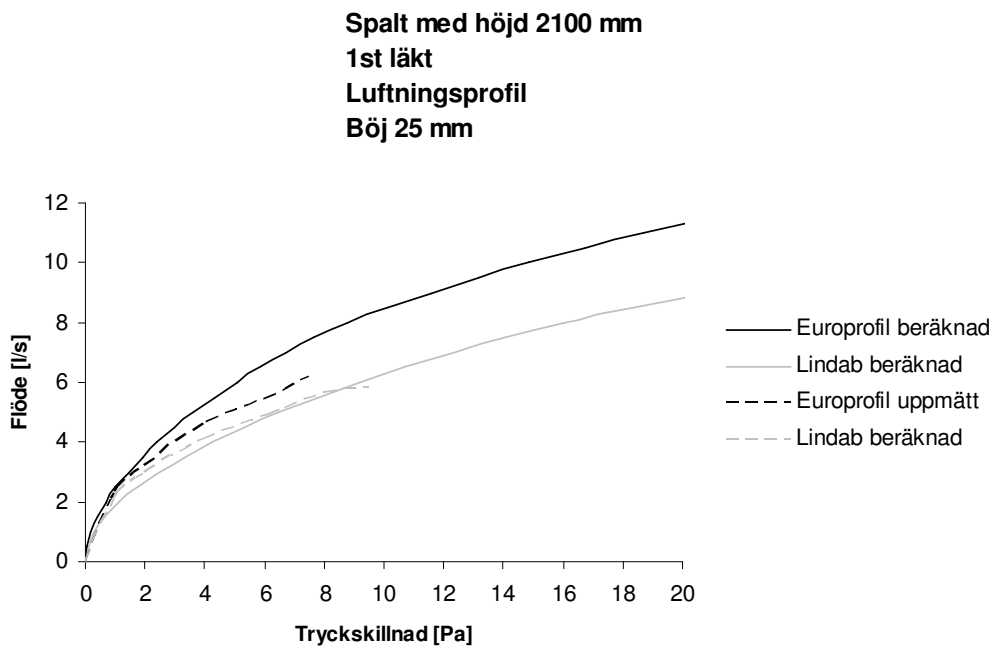


**Diagram 11**

Diagram 12-13 visar uppmätta flöden (streckad linje) jämfört med beräkningsmodell (heldragen linje) för 2100mm spalt, 1st läkt, luftningsprofil och 12mm resp. 25mm inlopp.

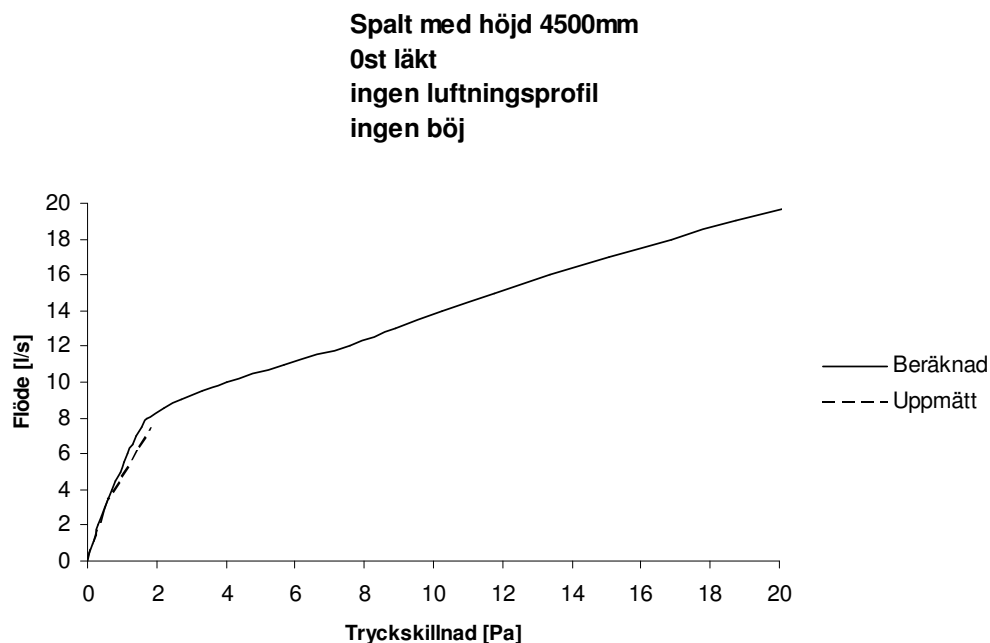


**Diagram 12**



**Diagram 13**

Diagram 14 visar uppmätta flöden (streckad linje) jämfört med beräkningsmodell (heldragen linje) för 4500mm spalt, utan läkt, luftningsprofil och böj vid inlopp.



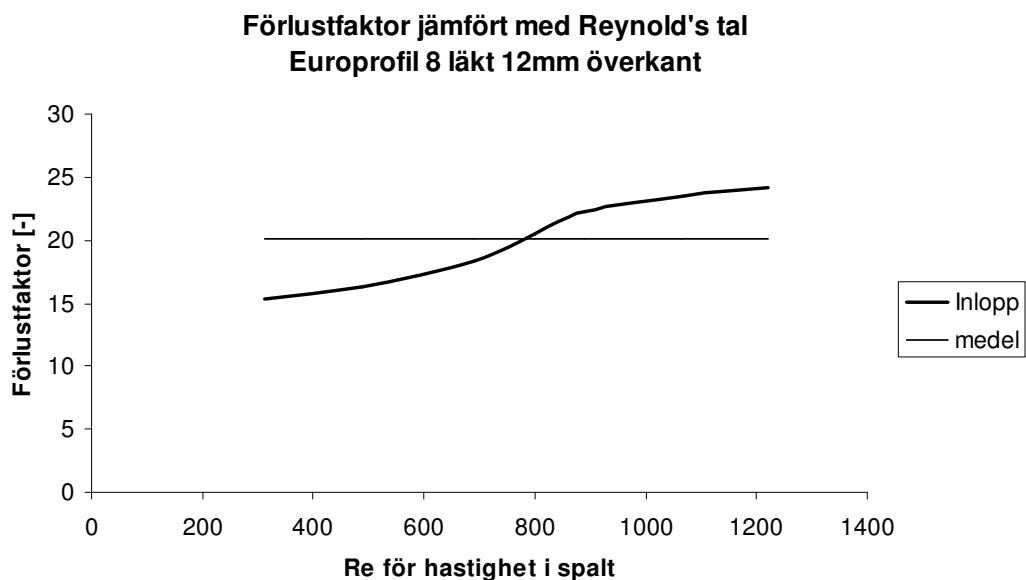
**Diagram 14**

## 8.2 Redovisning av uppmätta förlustfaktorer

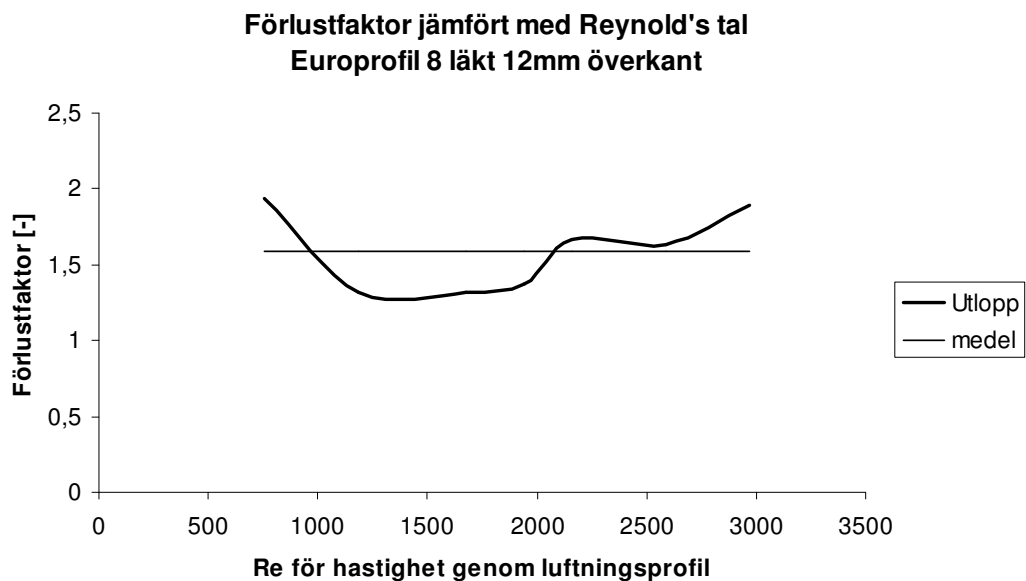
Nedanstående diagram visar förlustfaktorn i förhållande till Reynolds tal. För de första åtta diagrammen är förlustfaktorn beräknad för inlopp(överkant) resp. utlopp(luftningsprofil) medan de två sista är förlustfaktorer beräknade för separat läkt i kombination med olika spaltutföranden. I samtliga fall är spaltens längd 4,5m. Reynolds tal är beräknat för hastigheten i spalten i diagrammen där förlustfaktorn för inlopp redovisas. För övriga diagram är Reynolds tal beräknat för hastigheten genom motståndet. Detta står även i diagrammen.



Diagram 15-18 visar förlustfaktor och medelvärde för förlustfaktorn för inlopp resp. utlopp (luftningsprofil). Samtliga diagram gäller för spalt med 8st Europrofil läkt, inlopp 12mm eller 25mm.

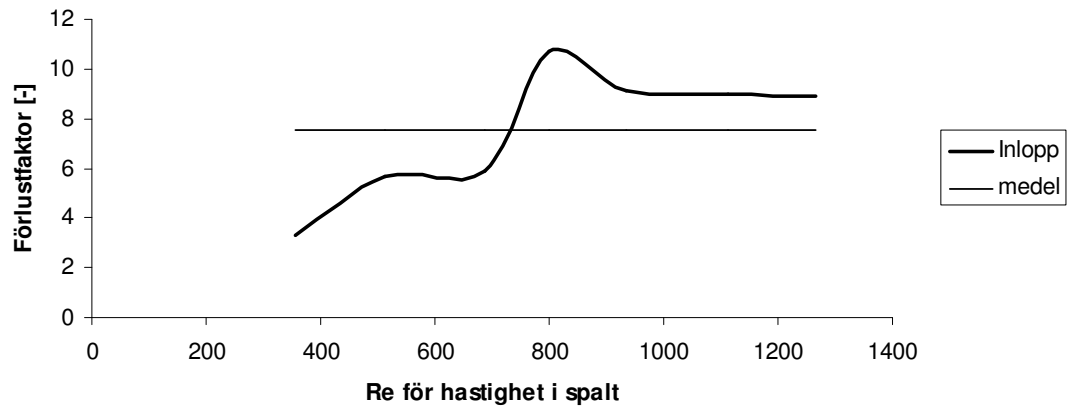


**Diagram 15**



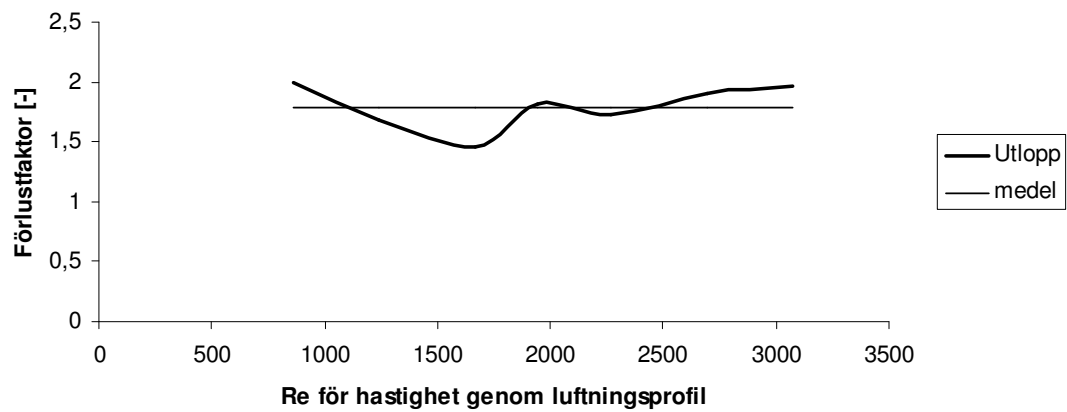
**Diagram 16**

**Europrofil med 8 läkt 25mm överkant**



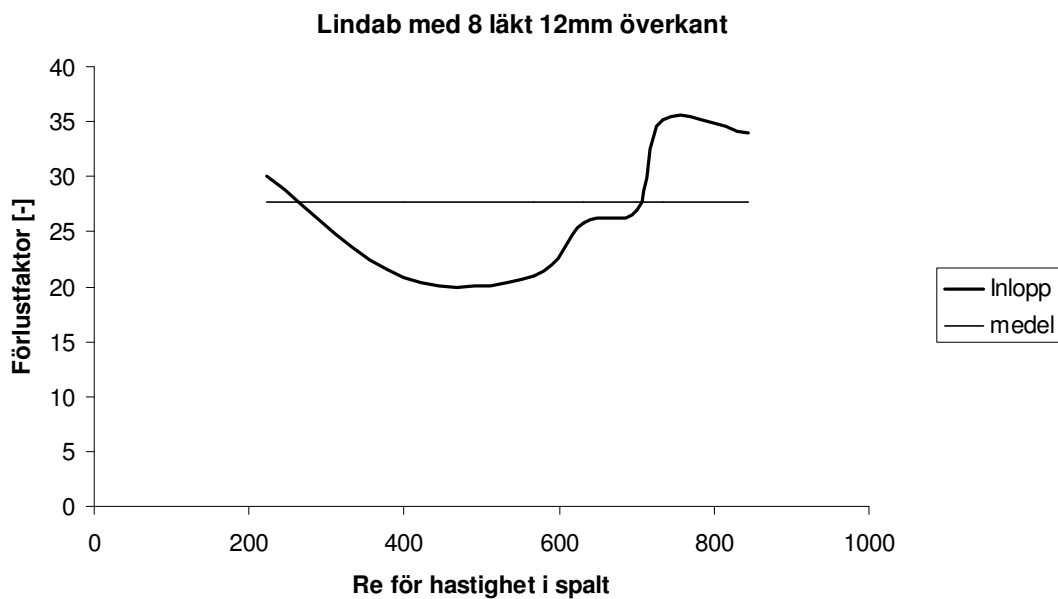
**Diagram 17**

**Europrofil med 8 läkt 25mm överkant**

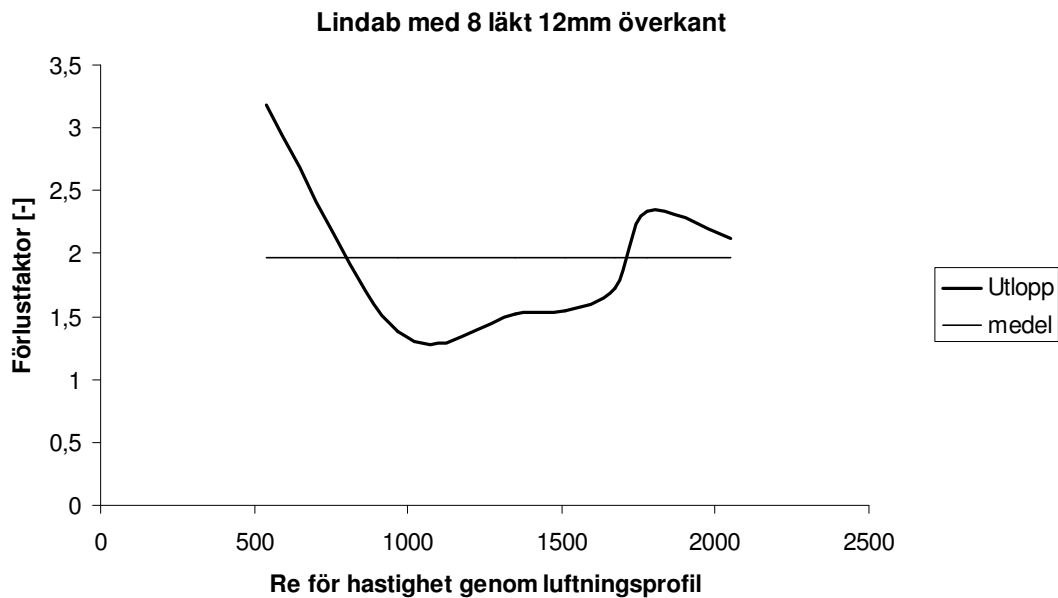


**Diagram 18**

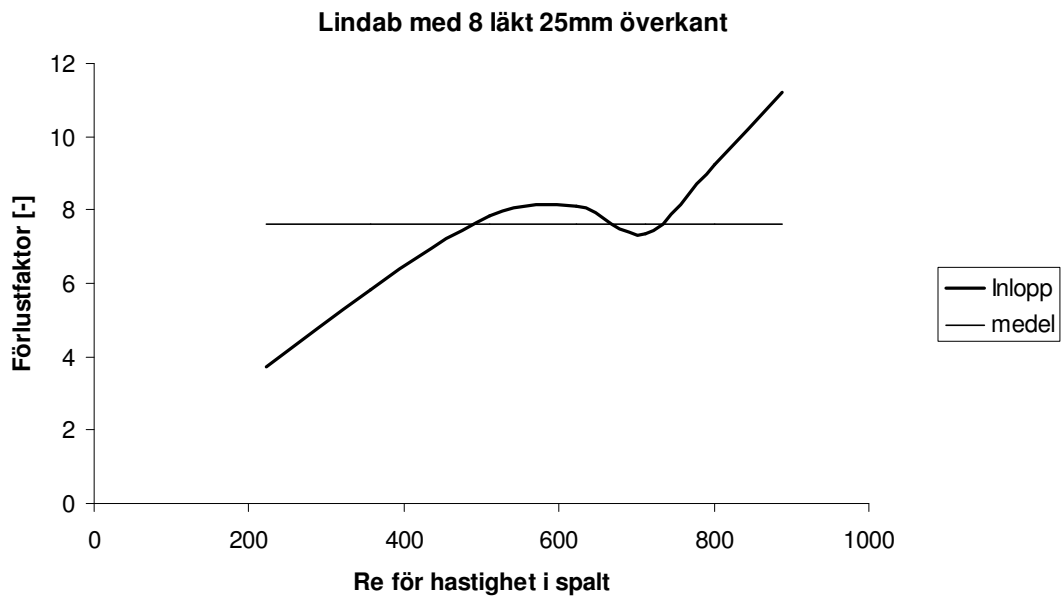
Diagram 19-22 visar förlustfaktor och medelvärde för förlustfaktorn för inlopp resp. utlopp (luftningsprofil). Samtliga diagram gäller för spalt med 8st Lindab läkt, inlopp 12mm eller 25mm.



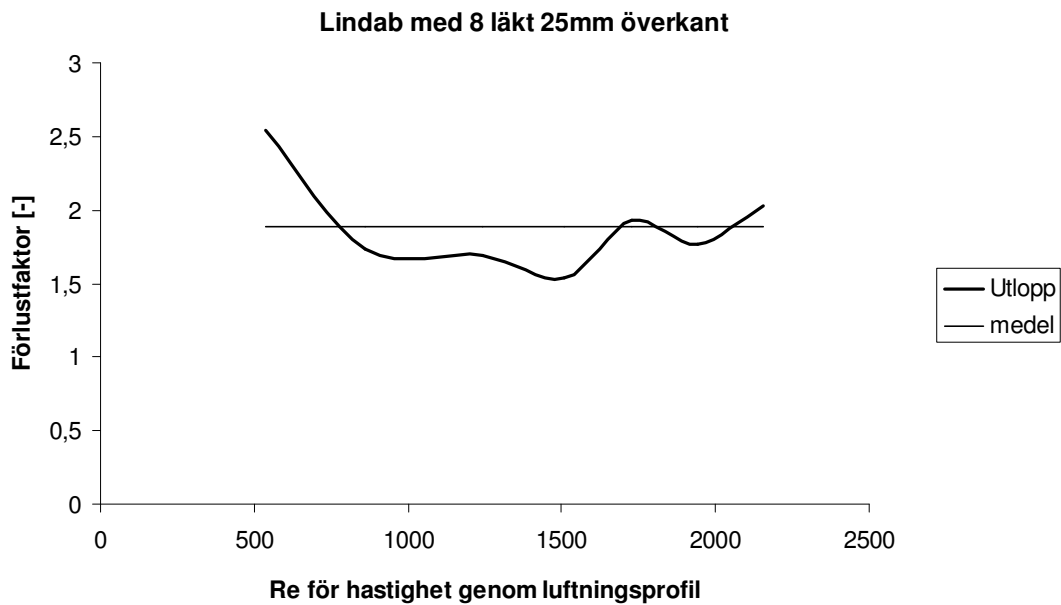
**Diagram 19**



**Diagram 20**



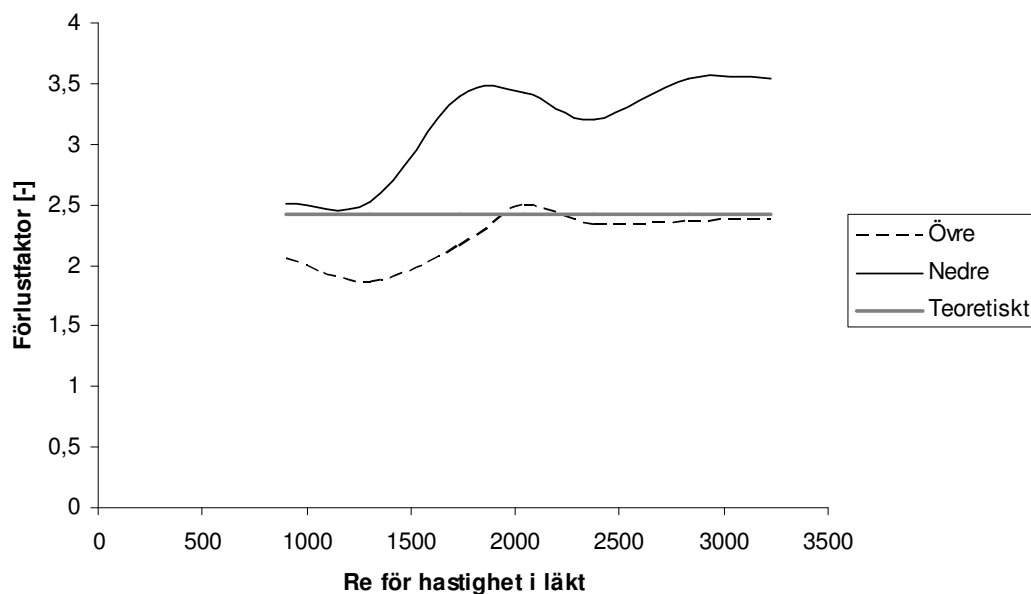
**Diagram 21**



**Diagram 22**

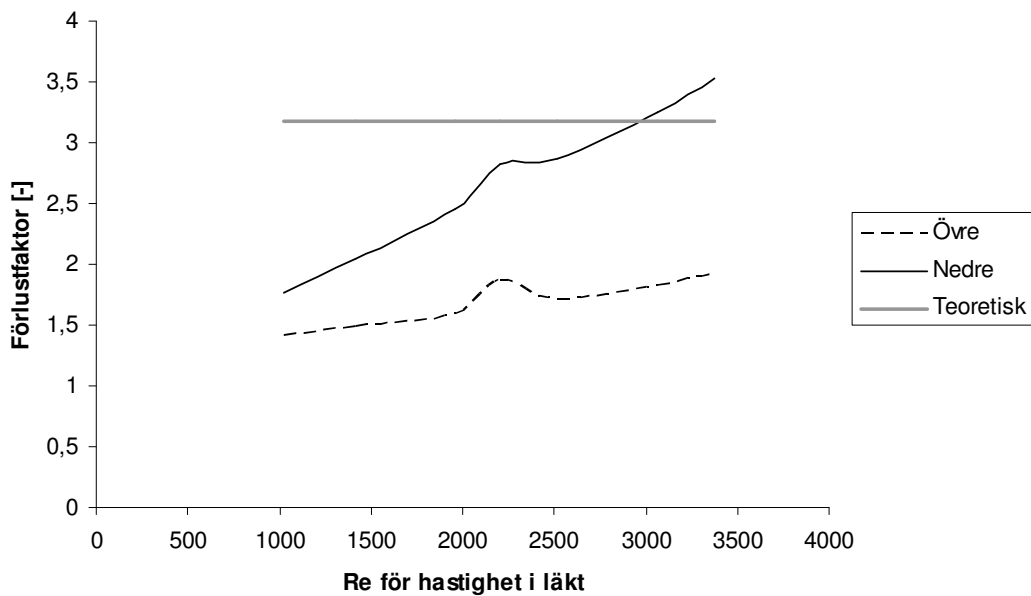
Diagram 23-24 visar förlustfaktor för ett läkt i spalten. Samtliga diagram gäller för spalt med 8st läkt, inlopp 25mm och luftningsprofil. "Övre" är läkt nära inlopp och "Nedre" är läkt nära utlopp. Teoretisk värde är från beräkningsmodell.

**Förlustfaktorer över läkt europrofil**



**Diagram 23**

**Förlustfaktorer över läkt lindab**



**Diagram 24**

## 9 Felkällor

I samtliga utföranden har våra mätningar gett större luftflöden än vad den teoretiska modellen anger vid mätning med flödesrör. En möjlig anledning till att för stora luftflöden uppmätts kan vara att sträckan mellan fläkt och strypfläns har varit för kort. Efter genomförda mätningar framkom information om att vid nyttjande av denna princip skall avståndet mellan fläkt och strypfläns vara minst 30 gånger rördiametern. En mätning gjordes med denna modifiering, men inga uppenbara skillnader påvisades. Trots att arbete lades ner för att täta provriggen noggrant, så har otätheter funnits. Efter utförda mätningar upptäcktes ett litet hål mellan fläkt och tryckutjämningsboxen. Det är troligt att fläkten dragit tjuvluft p.g.a. denna otäthet och kan då förklara varför vi får högre flöden än de teoretiska.

När vi använde oss av anemometerns registrerade hastighet för att beräkna flödet i spalten erhöles goda resultat jämfört med beräkningsmodellen. Antaganden har gjorts om att hastighetsprofilen ser ut som [1] beskriver dess utseende för luft som strömmar i smal spalt. Detta kan inte med säkerhet styrkas att det gäller för vårt fall och förändrar då resultaten. Kalibreringsfel på mätdonen kan också vara en orsak till att man inte fått exakta värden, men det känns inte speciellt troligt att man kan förkasta några mätresultat p.g.a. detta. Den teoretiska beräkningsmodellen behöver inte heller vara rätt.

## 10 Slutsats

Genom redovisade diagram för de två mätmetoderna kan olika resultat utläsas. Enligt våra mätningar med flödesröret kan man konstatera att den teoretiska beräkningsmodellen i de flesta fall överskattar motstånden och får därmed lägre luftflöden vid givna tryckskillnader.

Förutsatt att denna mätmetod är korrekt är en positiv effekt att flödena i verkligheten är större än de beräknade och därmed blir uttorkningen effektivare. Felet är så att säga på "rätt sida".

När volymflödet kommer från beräkning av hastigheten från anemometern så fås en bättre överensstämmelse med den beräknade grafen. För läkt av Europrofil tenderar dock teoretisk och uppmätta grafer att avvika marginellt från varandra. Till skillnad från ovan nämnda resultat så underskattar beräkningsmodellen i detta fall motståndet och flödet blir mindre. Grafen för Lindabläktet följer med ganska god precision den beräknade grafen genom hela mätområdet och styrker den teoretiska modellen.

Vid beräkning av förlustfaktorn för Europrofil så fick vi väldigt god överensstämmelse med den teoretiska modellen. För Lindabs läkt var den teoretiska förlustfaktorn större än den uppmätta. Detta kan vara en trolig förklaring till varför det är ett större glapp mellan uppmätt och teoretisk flödesgraf för Lindabläktet än vad det är för Europrofil vid mätning med flödesrör.

Förlustfaktorn över luftningsprofilen (i vårt fall utloppet) gav en mycket bra överensstämmelse med det teoretiska värdet i hela spektrumet som vi mätt. Att bestämma en entydig förlustfaktor för inloppet vilket motsvarade passagen där luftströmmen ska vända 180°, visade sig vara en mycket svår operation då detta är mycket beroende av Reynold's tal.

Eftersom graferna är framtagna på relativt små mätserier är det svårt att säga om det är våra mätserier som är de rätta eller om den teoretiska modellen är korrekt.

Även då vi bara gjort ett fåtal mätningar på varje kombination så har resultatet alltid visat på ett högre flödesvärde än vad den teoretiska modellen antytt vid mätning med flödesrör.

Vid antagande om att omräknad hastighet från anemometern är den korrekta bekräftar detta den teoretiska modellen bra och får ses som tillförlitlig.

# 11 Bilagor

## 11.1 Tabell för beräkning av k värde

### ASME RESEARCH REPORT ON FLUID METERS

TABLE 16  
Values of the Flow Coefficient,  $K$ , Velocity of Approach Factor Included, as a Function of the Pipe Reynolds Number,  $R_D$ , and Diameter Ratio,  $\beta$   
1½ In. and Larger Pipes with Corner Taps

$R_D$	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	8,000	10,000	20,000	30,000	40,000	50,000	100,000	500,000	10*	10†
0.100	0.6091	0.6027	0.5999	0.5982	0.5971	0.5962	0.5950	0.5942	0.5922	0.5913	0.5907	0.5904	0.5895	0.5883	0.5880	0.5875
0.150	0.6119	0.6055	0.6025	0.6009	0.5997	0.5988	0.5976	0.5968	0.5948	0.5939	0.5933	0.5929	0.5920	0.5908	0.5905	0.5900
2.00	0.6151	0.6084	0.6055	0.6037	0.6026	0.6017	0.6004	0.5996	0.5975	0.5965	0.5960	0.5956	0.5947	0.5934	0.5931	0.5926
2.50	0.6188	0.6119	0.6089	0.6070	0.6058	0.6049	0.6038	0.6027	0.6005	0.5996	0.5990	0.5986	0.5976	0.5963	0.5960	0.5955
3.00	0.6236	0.6163	0.6131	0.6111	0.6098	0.6088	0.6074	0.6063	0.6042	0.6032	0.6025	0.6021	0.6011	0.5997	0.5994	0.5988
3.25	0.6266	0.6190	0.6156	0.6136	0.6122	0.6112	0.6097	0.6088	0.6063	0.6053	0.6046	0.6042	0.6031	0.6017	0.6013	0.6008
3.50	0.6310	0.6220	0.6183	0.6164	0.6149	0.6138	0.6123	0.6113	0.6089	0.6076	0.6070	0.6065	0.6054	0.6039	0.6035	0.6029
3.75	0.6341	0.6256	0.6218	0.6196	0.6180	0.6169	0.6153	0.6142	0.6116	0.6103	0.6096	0.6091	0.6079	0.6063	0.6059	0.6053
4.00	0.6389	0.6297	0.6257	0.6233	0.6216	0.6204	0.6187	0.6176	0.6148	0.6134	0.6126	0.6121	0.6108	0.6091	0.6087	0.6080
4.25	0.6444	0.6345	0.6302	0.6276	0.6258	0.6245	0.6226	0.6214	0.6184	0.6169	0.6161	0.6155	0.6141	0.6118	0.6111	0.6104
4.50	0.6507	0.6400	0.6353	0.6325	0.6305	0.6291	0.6278	0.6257	0.6225	0.6208	0.6199	0.6193	0.6178	0.6158	0.6153	0.6145
4.75	0.6582	0.6464	0.6412	0.6381	0.6360	0.6344	0.6330	0.6307	0.6271	0.6253	0.6244	0.6237	0.6220	0.6198	0.6193	0.6184
5.00	0.6667	0.6537	0.6479	0.6445	0.6421	0.6404	0.6380	0.6363	0.6321	0.6304	0.6293	0.6286	0.6267	0.6243	0.6237	0.6227
5.20	0.6743	0.6602	0.6539	0.6502	0.6476	0.6457	0.6431	0.6413	0.6370	0.6348	0.6336	0.6328	0.6308	0.6282	0.6275	0.6265
5.40	0.6837	0.6675	0.6607	0.6566	0.6538	0.6518	0.6489	0.6469	0.6422	0.6398	0.6385	0.6376	0.6354	0.6325	0.6318	0.6307
5.60	0.6929	0.6759	0.6684	0.6639	0.6608	0.6585	0.6555	0.6532	0.6480	0.6454	0.6440	0.6430	0.6406	0.6374	0.6367	0.6354
5.80	0.7040	0.6853	0.6770	0.6720	0.6686	0.6661	0.6627	0.6603	0.6544	0.6517	0.6501	0.6491	0.6464	0.6429	0.6420	0.6406
6.00	0.7166	0.6958	0.6866	0.6812	0.6774	0.6747	0.6708	0.6682	0.6618	0.6587	0.6570	0.6558	0.6528	0.6489	0.6480	0.6465
6.20	0.7307	0.7077	0.6975	0.6914	0.6872	0.6842	0.6799	0.6770	0.6699	0.6665	0.6645	0.6632	0.6600	0.6557	0.6546	0.6529
6.40	0.7465	0.7209	0.7096	0.7028	0.6982	0.6948	0.6900	0.6868	0.6789	0.6751	0.6729	0.6715	0.6679	0.6630	0.6619	0.6600
6.60	0.7643	0.7357	0.7231	0.7155	0.7104	0.7066	0.7012	0.6976	0.6889	0.6846	0.6822	0.6806	0.6765	0.6712	0.6699	0.6678
6.80	0.7842	0.7523	0.7382	0.7297	0.7240	0.7197	0.7138	0.7097	0.6999	0.6951	0.6925	0.6906	0.6861	0.6801	0.6787	0.6763
7.00	0.8065	0.7708	0.7549	0.7455	0.7390	0.7343	0.7276	0.7230	0.7117	0.7067	0.7037	0.7017	0.6966	0.6899	0.6881	0.6857
7.20	0.8328	0.7925	0.7747	0.7641	0.7568	0.7515	0.7440	0.7388	0.7261	0.7205	0.7171	0.7148	0.7091	0.7015	0.6997	0.6967
7.40	0.8637	0.8181	0.7980	0.7860	0.7778	0.7717	0.7632	0.7574	0.7430	0.7366	0.7328	0.7302	0.7238	0.7152	0.7132	0.7098
7.60	0.8992	0.8476	0.8247	0.8111	0.8017	0.7949	0.7852	0.7786	0.7623	0.7551	0.7508	0.7478	0.7405	0.7308	0.7284	0.7246
7.80	0.9412	0.8812	0.8551	0.8396	0.8290	0.8211	0.8102	0.8029	0.7841	0.7758	0.7709	0.7676	0.7592	0.7481	0.7455	0.7412
8.00	0.9895	0.9182	0.8895	0.8718	0.8597	0.8507	0.8382	0.8296	0.8084	0.7990	0.7934	0.7895	0.7800	0.7674	0.7644	0.7594
8.20	1.0441	0.9602	0.9285	0.9080	0.8941	0.8839	0.8695	0.8597	0.8354	0.8247	0.8182	0.8139	0.8030	0.7885	0.7850	0.7794

All values below the heavy stepped line are extrapolations and subject to twice the tolerances given in Table 17. The solid line applies to 1½ in. pipe, the broken line to 12 in. pipe and larger. Interpolate linearly for intermediate sizes.

FIGUR 5. FLÖDESKOEFFICIENTEN  $K$  SOM FUNKTION AV REYNOLDSTALET I RÖRLEDNINGEN REJ OCH DIAMETERFÖRHÅLLET  $\beta = D/d$ .



## 12 Referenser

1. Kronvall, Johnny, *Air Flows in Building Components*, Division of Building Technology, Lund Institute of Technology, Report TVBH-1002, 1980.
2. Jönsson, Göran, *Fysik i vätskor och gaser*, Sociologiska institutionen i Lund, 2006.
3. Wadsö, Lars, *Luftrörelser i skalmursspalter*, Avdelningen för Byggnadsmateriallära, Lunds Tekniska Högskola, Rapport TBBM-5009, 1986.
4. Falk, Jörgen, ej publicerat material, Avdelningen för Byggnadsmateriallära, Lunds Tekniska Högskola, 2009
5. Eriksson, D., Norberg, C., *Kompendium i grundläggande strömningslära*, Institutionen för Energivetenskap, Lunds Tekniska Högskola, 2006
6. Tyllered, G, *Termodynamik*, Institutionen för Mekanisk värmeteori med strömningslära