

# Beräkningsmetoder för ventilationskanalsystem

*Michael Molander*

---

Avdelningen för installationsteknik  
Institutionen för bygg- och miljöteknologi  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet, 2012  
Rapport TVIT--12/5031



## Lunds Universitet

Lunds Universitet, med nio fakulteter samt ett antal forskningscentra och specialhögskolor, är Skandinaviens största enhet för forskning och högre utbildning. Huvuddelen av universitetet ligger i Lund, som har 100 400 invånare. En del forsknings- och utbildningsinstitutioner är dock belägna i Malmö, Helsingborg och Ljungbyhed. Lunds Universitet grundades 1666 och har idag totalt 6 000 anställda och 41 000 studerande som deltar i ett 90-tal utbildningsprogram och ca 1000 fristående kurser erbjudna av 88 institutioner.

## Avdelningen för installationsteknik

Avdelningen för Installationsteknik tillhör institutionen för Bygg- och miljöteknologi på Lunds Tekniska Högskola, som utgör den tekniska fakulteten vid Lunds Universitet. Installationsteknik omfattar installationernas funktion vid påverkan av människor, verksamhet, byggnad och klimat. Forskningen har en systemanalytisk och metodutvecklande inriktning med syfte att utforma energieffektiva och funktionssäkra installationssystem och byggnader som ger bra inneklimat.

Nuvarande forskning innefattar bl a utveckling av metoder för utveckling av beräkningsmetoder för godtyckliga flödessystem, konvertering av direktelvärmade hus till alternativa värmesystem, vädring och ventilation i skolor, system för brandsäkerhet, alternativa sätt att förhindra rökspredning vid brand, installationernas belastning på yttre miljön, att betrakta byggnad och installationer som ett byggnadstekniskt system, analysera och beräkna inneklimatet i olika typer av byggnader, effekter av brukarnas beteende för energianvändning, reglering av golvvärmesystem, bestämning av luftflöden i byggnader med hjälp av spårgasmetod. Vi utvecklar även användbara projekteringsverktyg för energi och inomhusklimat, system för individuell energimätning i flerbostadshus samt olika analysverktyg för optimering av ventilationsanläggningar hos industrin.

# Beräkningsmetoder för ventilationskanalsystem

$$\Delta p = kq^n$$

*Michael Molander*

© *Michael Molander*  
ISRN LUTVDG/TVIT--12/5031--SE(84)

Avdelningen för installationsteknik  
Institutionen för bygg- och miljöteknologi  
Lunds tekniska högskola  
Lunds universitet  
Box 118  
22100 LUND

# Förord

Föreliggande rapport är resultatet av ett examensarbete utfört på Avdelningen för Installations-teknik vid Lunds Tekniska Högskola under 2011.

Undertecknad vill framföra ett stort tack till min handledare teknologie licentiat Mats Dahlblom, examinator teknologie doktor Dennis Johansson samt till professor Lars Jensen för professionell vägledning och goda råd under examensarbetets gång.

Ett tack riktas också till företagen *Bengt Dahlgren AB*, *CADCOM AB*, *Ramböll AB* och *Sweco Systems AB* för er hjälp med att besvara mina frågor.

Inte minst vill jag tacka min familj som stått ut med mig och mina förhåvanden under rapportens tillblivande.

Avslutningsvis vill jag framföra ett tack till min svärfar doktor Stefan Henningsson som med kort varsel utfört värdefull korrektur.

Lund i december 2011

A handwritten signature in black ink that reads "Michael Molander". The signature is written in a cursive, slightly slanted style.

Michael Molander

# Sammanfattning

För att uppfylla samhällets krav på ett bra inomhusklimat i lokaler och byggnader krävs det korrekt dimensionerade ventilationssystem. Ett korrekt dimensionerat ventilationssystem är ett system som levererar rätt flöde vid låga hastigheter och låga tryckfall. Detta innebär utöver energi-effektiv distribution också reducerat buller från både luftbehandlingsaggregat och ventilationskanalsystem.

För att åstadkomma detta krävs bland annat korrekt utförda beräkningar av både flöden och tryckfall både för kanaler och för anslutningar. Genom att jämföra olika beräkningsmetoder visas här dels att det finns flera olika lösningar på samma problem, vikten av att kunna tillämpa och använda olika beräkningsmetoder och kombinationer av dem, och dels betydelsen av korrekta indata.

De här redovisade beräkningsmetoderna skiljer sig i princip endast genom förfarandet och därmed åtföljande lämplighet för hand- eller datorberäkning. Resultaten är snarlika och skillnaderna dem emellan, med avseende på resultatet, betingas snarare av indatas beskaffenhet än av val av metod.

Att kunna tillämpa handberäkningsmetoder kan tyckas vara överspelat, med dagens moderna integrerade datorberäknings- och projekteringsverktyg men det finns exempel på situationer då de integrerade beräkningsmetoderna inte kan tillämpas.

Tryckfallsberäkning av kanalsystem är långt ifrån en exakt vetenskap, men för att kunna leverera bra lösningar behöver vi också ha kunskap om de olika beräkningsmetoder som finns tillgängliga, hur de tillämpas och vilka begränsningar de har.

# Abstract

In order to meet society's demand for a suitable indoor climate in rooms and buildings properly sized ventilation systems are required. A properly sized ventilation system is a system that supplies the correct flow at low speed and low pressure drop. This means, in addition to energy-efficient distribution, also reduced noise from both air handling unit and the ductwork.

Achieving this requires accurate calculations of both flow and pressure drop for both the ducts and the fittings. By comparing different methods of calculation this report demonstrates that there are several different solutions to identical problems, the need to implement and use different calculation methods and combinations of them, and also the importance of accurate input data.

The computation methods presented here differ in principle only by the process and hence suitability for hand or computer calculation. The results are similar and the differences between them, with respect to the results, are more concerned with the nature of input data than the choice of method.

Being able to apply the hand calculation methods may seem obsolete with today's modern integrated computer calculation and design tools, but there are examples of situations where the integrated assessment methods are not applicable.

Pressure drop calculation of duct systems is far from an exact science, but to provide satisfactory solutions, we need to *inter alia* have knowledge of the different calculation methods available, their application and their limitations.

# Innehållsförteckning

1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte .....	1
1.3 Metod .....	2
1.4 Avgränsningar.....	2
2 Definitioner och samband .....	3
2.1 Flödesberäkning .....	4
2.2 Tryckfallsberäkning.....	4
2.3 Injustering.....	5
2.4 Ringmatning .....	5
2.5 Samband .....	6
3 Approximativa beräkningsuttryck .....	9
3.1 Tryckfall i don.....	9
3.2 Tryckfall i raka cirkulära kanaler.....	14
3.3 Tryckfall i kanalböjar.....	15
3.4 Tryckfall i T-stycke.....	23
4 Beräkningsmetoder .....	25
4.1 Handberäkning .....	25
4.1.1 Tabellmetod .....	25
4.1.2 Diagrammetod.....	33
4.2 Datorberäkning .....	40
4.2.1 Finita elementmetoden .....	40
4.2.2 Integrerad datorberäknings- och projekteringsmetod.....	47
4.3 Resultat .....	56
5 Intervju.....	57
6 Diskussion och slutsats .....	61
Bilaga .....	65
Referenser.....	79



# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

I den grundläggande civilingenjörsutbildningen på Lunds tekniska högskola (LTH) ingår idag begränsade moment av praktisk CAD-projektering för installationstekniska tillämpningar. Det finns många olika anledningar till detta, varav en är att det är svårt att genomföra dessa inom ramen för den tid som de olika kurserna har för att behandla ämnet. En annan anledning kan vara att utvecklingen inom området sker explosionsartat och att det därav inte finns möjlighet att hänga med.

Inom industrin finns idag ökad medvetenhet, önskan och pågående utveckling inom CAD/BIM området även när det handlar om installationstekniska tillämpningar. Denna utveckling har tidigare framförallt dominerats och drivits av andra branschers behov och då framförallt inom maskinkonstruktion. Det *digitala byggandet* har därefter accelererat och har nu även fått relevans för VVS-branschen.

Flertalet svenska företag inom installationsbranschen har idag fungerande rutiner och metoder för att hantera projektering av VVS-system där metadata kan slussas vidare till olika aktörer i byggprocessen och/eller genereras och presenteras vid behov. Det har skett och sker dagligen en utveckling av de verktyg som stödjer dessa processer, något som framtvingar allt mer sofistikerade digitala modeller, där integrerade funktioner för beräkning, dimensionering och kontroll ingår som naturliga delar av den normala projekteringen.

## 1.2 Syfte

Att visa alternativa beräknings- och projekteringsmetoder, för ventilationskanalsystem, än de som lärs ut på LTH idag, dels för att skapa diskussion och dels för att:

- Visa på behovet av utökat utbildningsmaterial
- Visa på strukturerade beräkningsmetoder som är lämpliga för datorberäkning
- Visa på beräkningsmetoder som är praxis i VVS-branschen idag

Avsikten är alltså inte att döma ut eller förkasta befintliga metoder eller tillvägagångsätt, utan att jämföra olika metoder genom att visa på deras existens och tillämpbarhet. Ytterligare syfte med rapporten har varit att resultatet ska kunna vara användbart framför allt inom undervisning, och detta förhoppningsvis utan omfattande förädling. Innehållet i rapporten kan också utgöra underlag för konstruktion av datorprogram.

## 1.3 Metod

Arbetet är baserat dels på befintliga beräkningsmetoder, som idag lärs ut på LTH, dels på beräkningsmetoder som förekommer både inom den akademiska världen och inom industrin. Genom litteraturstudier och genom att prova, anpassa och föreslå beräkningsuttryck och metoder andra än de idag inarbetade beräkningsmetoderna, samt att visa på metoder som är praxis i branschen, hoppas jag att så ett frö för fortsatt utveckling inom området. Vid numerisk beräkning har framförallt beräkningsprogrammet *Matlab* används. Det förekommer även beräkningar med de integrerade beräkningsfunktionerna i *MagiCAD*. För grafisk presentation har framförallt *Microsoft Visio* och *MagiCAD for AutoCAD* använts.

## 1.4 Avgränsningar

Det har varit författarens ambition att försöka tillämpa de ovan beskrivna metoderna för ämnesområdets samtliga delar (värme, ventilation, avlopp och sprinkler). Rapportens redan på förhand explicit definierade omfattning har dock gjort att endast begränsade områden som berör *ventilation* kommer att behandlas här. Rapporten kommer därför att begränsas till ventilationsberäkningar som berör:

- Flödesberäkning
- Dimensionering
- Tryckfallsberäkning
- Balansering

Rapportens omfattning ger visserligen endast en mycket begränsad inblick i de beräkningar som en VVS-projektör behöver behärska men det kanske är tillräckligt för att skapa en ökad förståelse för vad som krävs för att konstruera energieffektiva ventilationssystem. Läsaren uppmanas dock att försöka se de likheter och fördelar metoderna kan ha även för de andra delarna av installations-tekniken.

## 2 Definitioner och samband

Definitioner och samband som behandlas i rapporten

Betckning	Beskrivning	Enhet
$\Delta p$	Tryckfall	[Pa]
$\Delta p_{tot}$	Totalt tryckfall	[Pa]
$\Delta p_{don}$	Dontryckfall	[Pa]
$\Delta p_f$	Friktionstryckfall i rakkanal	[Pa]
$\Delta p_e, \Delta p_j$	Engångstryckfall	[Pa]
$\Delta p_{system}$	Tryckfall orsakade av systemeffekter	[Pa]
$\Delta p_{injustering}$	Injusteringstryckfall över don	[Pa]
$p_v, p_d$	hastighetstryckfall, dynamisktryckfall	[Pa]
$k$	$k$ – värde	[–]
$q$	Volymflöde	[m <sup>3</sup> / s]
$Q$	Massflöde	[kg / s]
$L$	Längd	[m]
$L_{ekv}$	Ekvivalentlängd	[m]
$\lambda$	Friktionskoefficient	[–]
$R$	Friktionskoefficient	[Pa / m]
$\zeta, C$	Motståndstal	[–]
$Re$	Reynolds tal	[–]
$\mu$	Viskositet	[Pa · s]
$A$	Tvårsnittsarea	[m <sup>2</sup> ]
$d$	Diameter	[m]
$\rho$	Densitet	[kg / m <sup>3</sup> ]
$v$	Hastighet	[m / s]
$\nu$	Kinematisk viskositet	[m <sup>2</sup> / s]
$\mathbf{K}^e$	Elementstyvhetsmatris	
$\mathbf{K}^{ee}$	Expanderad elementstyvhetsmatris	
$\mathbf{K}$	Global styvhetsmatris	
$\mathbf{a}^e$	Elementvektor	
$\mathbf{a}^{ee}$	Expanderad elementvektor	
$\mathbf{a}$	Global elementvektor	
$\mathbf{f}^e$	Element lastvektor	
$\mathbf{f}^{ee}$	Expanderad element lastvektor	
$\mathbf{f}$	Global element lastvektor	

## 2.1 Flödesberäkning

Flödesberäkning av kanalsystem baseras på det faktum att summan av flödet som strömmar till en viss punkt är lika med summan av flödet som strömmar från samma punkt. Detta förutsätter samtidigt att det inte förekommer något läckage.

$$\sum Q_{ut} = \sum Q_{in} \quad (2.1)$$

Alla monterade kanalsystem har ett visst läckage och normalt kan man räkna med att cirka 5 % av luftflödet utgörs av läckage. För större förgrenade system med rektangulära kanaler kan läckageflödet bli så stort som 10 % trots noggrant utförande (Warfvinge & Dahlblom, 2010). För projektering kan därför ekvation (2.1) skrivas som

$$\sum Q_{ut} = (1 - l_f) \sum Q_{in}, \quad \text{där} \begin{cases} l_f = 0.05 \text{ för system med cirkulära kanaler} \\ l_f = 0.10 \text{ för system med rektangulära kanaler} \end{cases} \quad (2.2)$$

## 2.2 Tryckfallsberäkning

Vid tryckfallsberäkningar av kanalsystem tas hänsyn till tryckfall över don, friktionstryckfall för rak kanal, engångstryckfall över böjar, T-stycken, dimensionsförändringar och andra för systemet friktionshöjande komponenter. Summan av dessa tryckfall (strömningsmotstånd) utgör det totala tryckfallet för den studerade sträckan. Det är det maximala tryckfallet och summan av flödet som utgör dimensioneringskriterier för fläkten som ska driva systemet.

Normalt förfarande vid traditionell tryckfallsberäkning (handberäkning) och dimensionering av kanalsystem för till- och frånluft är olika tabell- eller diagrambaserade metoder. Därtill används även analytiska metoder som utnyttjar de ekvationer som gäller för det studerade sambandet utan ytterligare förenkling eller approximation.

Vid tryckfallsberäkning av ventilationskanaler görs i normala fall en hel del förenklande antaganden<sup>1</sup>, bland annat förutsätts (Bigélius & Svennberg, 1974):

- Inkompressibel strömning
- Isotermiska förhållanden
- Ingen förändring av fluidens potentiella energi

---

<sup>1</sup> Vanligen antas att densiteten för luft är 1.2 kg/m<sup>3</sup> vid temperaturen 20 °C och trycket 101.3 kPa.

I de flesta fall är strömning i kanalsystem turbulent vilket innebär att Reynolds tal är större än 2300. Detta medför också att vi, även för det enklast förgrenade kanalsystem, har att göra med icke linjära differentialekvationer för vilka det oftast inte existerar någon enkel analytisk lösning.

Om man vill systematisera beräkningarna med hjälp av datorn behöver de analytiska ekvationerna oftast förenklas och approximeras. Det finns flera olika numeriska iterativa metoder beskrivna för att åstadkomma detta, till exempel Hardy Cross' metod, lösning med Jacobian och Newtons metod, Finita differensmetoden med flera (Larock, Jeppson, & Watters, 2000).

Här vill jag dock bland annat undersöka hur detta kan ske med en alternativ metod nämligen med, FEM (Finita elementmetoden) (Ottosen & Petersson, 1992). Metoden är strukturerad och lämpar sig väl för datorberäkningar.

## 2.3 Injustering

Vid injustering av ventilationssystem kan man skilja mellan två metoder

- Förinställningsmetoden
- Proportionalitetsmetoden

Förinställningsmetoden kräver att dimensionering av kanalsystemet är gjord och att don har valts. Baserat på flöde och tryckfall kan donen ges en projekterad (teoretisk) förinställning som uppfyller vald dimensioneringsprincip.

Proportionalitetsmetoden innebär att man justerar spjäll och don så att donet uppfyller projekterat luftflöde. Proportionalitetsmetoden förutsätter att det finns en verklig anläggning att injustera. Injusteringen sker systematiskt där arbetsmomenten utförs i en förutbestämd ordning (Jensen, Injustering, 1999).

## 2.4 Ringmatning

Om vi betraktar ett tilluftventilationssystem som matas från två håll har vi ett så kallat ringmatat system. Fördelarna är då att luften försörjer donen längst ut i systemet från två håll, vilket i de fall där symmetri förekommer kan förenkla flöde och tryckfallsberäkningar.

## 2.5 Samband

Totalt tryckfall i en ventilationskanal

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{don} + \Delta p_f + \Delta p_e + \Delta p_{system} \quad (2.3)$$

### Darcy–Weisbach

Ekvationen gäller för beräkning av tryckfall i rak kanal med cirkulärt tvärsnitt vid turbulent flöde (Street & Vennard, 1982).

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_f &= \frac{\lambda L}{d} \frac{\rho v^2}{2} \\ q = vA &= v \frac{\pi d^2}{4} \Leftrightarrow v = \frac{4q}{\pi d^2} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \Delta p_f = \frac{\lambda L}{d} \frac{\rho}{2} \left( \frac{4q}{\pi d^2} \right)^2 = \frac{\lambda L}{d} \frac{\rho}{2} \frac{16q^2}{\pi^2 d^4} = \frac{8\lambda L \rho}{\pi^2 d^5} q^2 \quad (2.4)$$

### Hagen–Poiseuille

Ekvationen gäller för beräkning av tryckfall i rak kanal med cirkulärt tvärsnitt vid laminärt flöde (Street & Vennard, 1982).

$$\Delta p_f = \frac{128\mu L}{\pi d^4} q \quad (2.5)$$

### Engångstryckfall

Ekvationen anger tryckfallet över en komponent och beräknas som motståndstalet multiplicerat med det dynamiska trycket (Warfvinge & Dahlblom, 2010).

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_e &= \zeta p_d \\ p_d &= \frac{\rho v^2}{2} \\ q = vA &= v \frac{\pi d^2}{4} \Leftrightarrow v = \frac{4q}{\pi d^2} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \Delta p_e = \zeta \frac{\rho}{2} \left( \frac{4q}{\pi d^2} \right)^2 = \zeta \frac{\rho}{2} \frac{16q^2}{\pi^2 d^4} = \zeta \frac{8\rho}{\pi^2 d^4} q^2 \quad (2.6)$$

## Reynolds tal

Ekvationen ger ett dimensionslöst värde som beskriver om flödet är laminärt eller turbulent (Street & Vennard, 1982).

$$\left. \begin{aligned} \text{Re} &= \frac{v}{\nu} d \\ q &= vA = v \frac{\pi d^2}{4} \Leftrightarrow v = \frac{4q}{\pi d^2} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \text{Re} = \frac{4q}{\pi d^2} \frac{d}{\nu} = \frac{4}{\pi d \nu} q \begin{cases} \text{Re} \leq 2300, \text{ laminärt} \\ \text{Re} > 2300, \text{ turbulent} \end{cases} \quad (2.7)$$

## Samband från ASHRAE Handbook

Ekvationer återges här med samma beteckningar som de har i handboken. Ekvation (2.8) beskriver motståndstalet som funktion av tryck, hastighet och densitet. Uttrycket är i princip detsamma som (2.6).

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{\Delta p_j}{\rho \frac{v^2}{2}} = \frac{2\Delta p_j}{\rho v^2} = \frac{\Delta p_j}{p_v} = \zeta \\ q &= vA = v \frac{\pi d^2}{4} \Leftrightarrow v = \frac{4q}{\pi d^2} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow C = \frac{2\Delta p_j}{\rho \left( \frac{4q}{\pi d^2} \right)^2} = \frac{\pi^2 d^4 \Delta p_j}{8\rho q^2} = \zeta \quad (2.8)$$

Tryckfallet genom konvergerande och divergerande komponenter (ex. Y-och T-stycken) beräknas som

$$\Delta p_j = C_{c,s} p_{v,c} \quad (2.9)$$

$$\Delta p_j = C_{c,b} p_{v,c} \quad (2.10)$$

Index  $s$  avser genomlopp (*straight*) och index  $b$  avser påstick/avgrening (*branch*).





## 3 Approximativa beräkningsuttryck

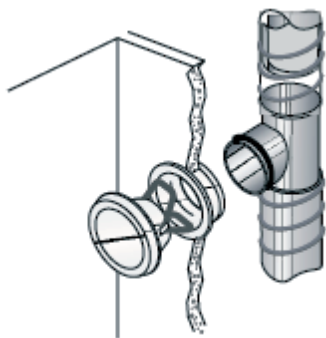
Genom att tillämpa ekvationerna i avsnitt 2.5 Samband, kan vi härleda approximativa beräkningsuttryck för bland annat tryckfall och flöde i don, raka cirkulära kanaler, kanalböjar och T-stycken. Här redovisas dock inte härledning eller approximativa uttryck för T-stycken. Den intresserade läsaren hänvisas till (Haghighi, Mohtar, Bralts, & Segerlind, 1991) för utförlig approximation av bland annat T-stycken.

### 3.1 Tryckfall i don

Doninställningen redovisas i datablad från tillverkaren. Tryckfallet är beroende av doninställningen och flödet genom donet. För frånluftsdon är det möjligt att förinställa kägellans läge, b-värdet, varvid olika motstånd erhålls (k-faktorn).

KGEB							
storlek 100	kägelläge "b"	-14	-12	-9	-6	0	6
	k-faktor	0,33	0,50	0,75	0,99	1,50	2,00
125	kägelläge "b"	-22	-18	-12	-6	0	6
	k-faktor	0,88	1,30	1,80	2,40	2,90	3,40
160	kägelläge "b"	-24	-18	-12	-6	0	6
	k-faktor	1,80	2,50	3,10	4,10	4,40	5,00

Tabell 1 Källa Stifab Farex, version 10-97



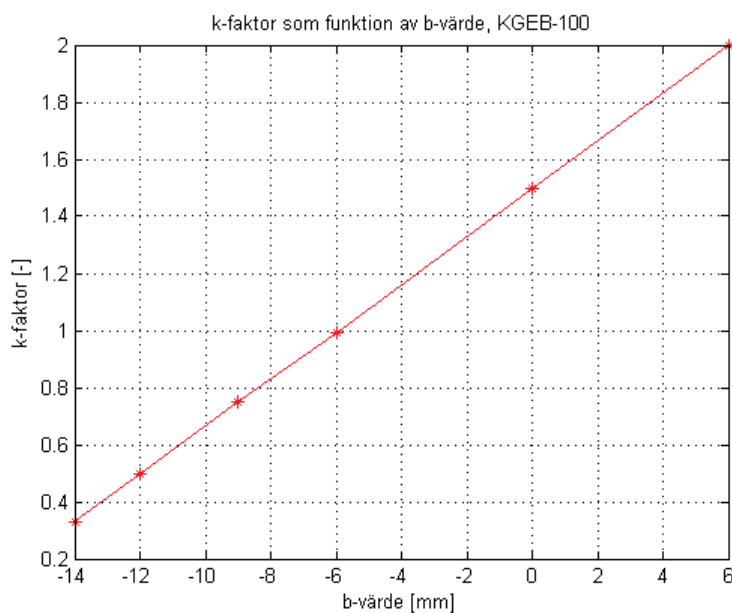
Samband mellan flödet och tryckfallet ges av följande uttryck:

$$q = k\sqrt{\Delta p}_{injustering} \quad (3.1)$$

### Exempel 3.1

Beräkningsuttryck för frånluftsdon.

Om vi plottar k-faktorn som funktion av b-värdet för KGEB-100 med data ur Tabell 1, erhålls följande figur



Figur 1 k-faktor som funktion av b-värde

Här kan vi konstatera att det finns ett tydligt *linjärt samband*<sup>2</sup> mellan k-faktorn och b-värdet. Ansatsen för att erhålla ett approximativt uttryck som satisfierar data ur Tabell 1 bör därför vara på formen

$$k = c_1 + c_2 b \quad (3.2)$$

där  $c_1$  och  $c_2$  är de konstanter som vi ska bestämma.

Vilket kan skrivas, på matrisform som

$$\begin{bmatrix} 1 & b_1 \\ 1 & b_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & b_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

---

<sup>2</sup> Jämför med räta linjens ekvation  $y = kx + m$

För frånluftdonet KGEB-100 erhålls då

$$\begin{bmatrix} 1 & -14 \\ 1 & -12 \\ 1 & -9 \\ 1 & -6 \\ 1 & 0 \\ 1 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.33 \\ 0.50 \\ 0.75 \\ 0.99 \\ 1.50 \\ 2.00 \end{bmatrix}$$

Med hjälp av minstakvadratmetoden kan vi lösa det överbestämda linjära ekvationssystemet  $\mathbf{Ax} \approx \mathbf{y}$ . Minstakvadratlösningen  $\mathbf{x}$  erhålls då som en lösning till systemet av normalekvationer

$$\mathbf{A}^T \mathbf{Ax} = \mathbf{A}^T \mathbf{y}$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -14 & -12 & -9 & -6 & 0 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -14 \\ 1 & -12 \\ 1 & -9 \\ 1 & -6 \\ 1 & 0 \\ 1 & 6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 & -35 \\ -35 & 493 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -14 & -12 & -9 & -6 & 0 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.33 \\ 0.50 \\ 0.75 \\ 0.99 \\ 1.50 \\ 2.00 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.07 \\ -11.31 \end{bmatrix}$$

Det överbestämda linjära ekvationssystemet  $\mathbf{Ax} \approx \mathbf{y}$  kan nu ersättas med det bestämda linjära ekvationssystemet

$$\begin{bmatrix} 6 & -35 \\ -35 & 493 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.07 \\ -11.31 \end{bmatrix}$$

Som har lösningen

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4984 \\ 0.0834 \end{bmatrix}$$

Vilket för KGEB-100 ger

$$k = 1.4984 + 0.0834b$$

Minsta felkvadratsumman, som är ett mått på approximationens giltighet, erhålls som summan av residualvektorns komponenter i kvadrat och definieras av ekvation (3.4) och (3.5). Ju lägre värde desto bättre approximation.

$$\sum r_i^2 = \mathbf{r}^T \mathbf{r} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (3.5)$$

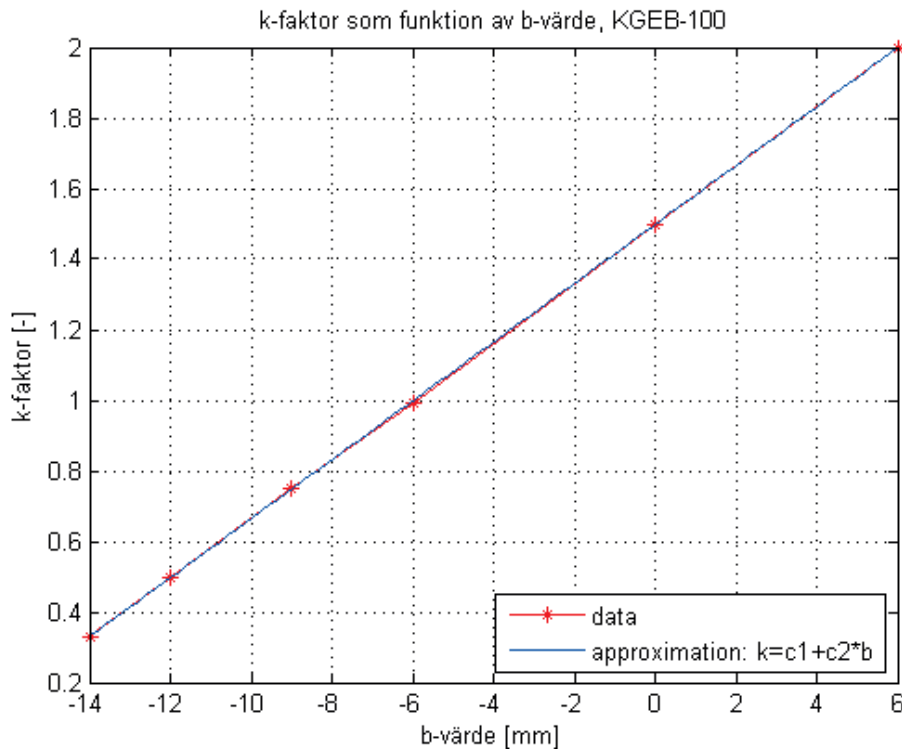
Residualvektorn (3.5) för approximationen (3.2) för frånluftsdonet KGEB-100 har vi som

$$\mathbf{r} = \mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 0.33 \\ 0.50 \\ 0.75 \\ 0.99 \\ 1.50 \\ 2.00 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & -14 \\ 1 & -12 \\ 1 & -9 \\ 1 & -6 \\ 1 & 0 \\ 1 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.4984 \\ 0.0834 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0003 \\ 0.0028 \\ 0.0025 \\ -0.0078 \\ 0.0016 \\ 0.0010 \end{bmatrix}$$

vilket ger oss felkvadratsumman enligt ekvation (3.4) som

$$\sum r^2 = \mathbf{r}^T \mathbf{r} = \begin{bmatrix} -0.0003 & 0.0028 & 0.0025 & -0.0078 & 0.0016 & 0.0010 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.0003 \\ 0.0028 \\ 0.0025 \\ -0.0078 \\ 0.0016 \\ 0.0010 \end{bmatrix} = \underline{\underline{7.8592 \cdot 10^{-5}}}$$

Felkvadratsumman är i sammanhanget ett relativt litet tal vilket innebär att approximationen får anses som bra.



**Figur 2** Jämförelse av data plot med approximation

Om vi dessutom antar att injusteringsstrycket<sup>3</sup> är det samma som dontryckfallet, det vill säga  $\Delta p_{don} = \Delta p_{injusterings}$  får vi med approximation (3.2) insatt i (3.1) samt omskrivning det generella approximativa beräkningsuttrycket

$$\Delta p_{don} = \frac{1}{(c_1 + c_2 b)^2} q^2 \quad (3.6)$$

Och vi har således för KGEB-100 att

$$\Delta p_{don} = \frac{1}{(1.4984 + 0.0834b)^2} q^2$$

Uttryck för övriga don kan beräknas på motsvarande sätt och då med fördel med hjälp av Matlab (eller Octave).

<sup>3</sup> Efter diskussion med professor Lars Jensen, LTH, 2011 framkom att det är möjligt att anta att injusteringsstrycket är lika stort som dontryckfallet.

## 3.2 Tryckfall i raka cirkulära kanaler

Friktionstryckfall  $\Delta p_f$  i raka cirkulära kanaler beräknas genom att multiplicera friktionskoefficienten  $R$  med kanallängden  $L$ .

$$\Delta p_f = RL \quad (3.7)$$

där

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{\lambda}{d} \frac{\rho v^2}{2} \\ v &= \frac{q}{\underbrace{A}_{\frac{\pi d^2}{4}}} = \frac{4q}{\pi d^2} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow R = \frac{\lambda}{d} \frac{\rho}{2} \left( \frac{4q}{\pi d^2} \right)^2 = \frac{8\lambda\rho}{\pi^2 d^5} q^2 \quad (3.8)$$

Vilket insatt i (3.7) ger

$$\Delta p_f = \frac{8\lambda\rho L}{\pi^2 d^5} q^2 \quad (3.9)$$

Och vi kan därför även teckna sambandet på den numera kända formen

$$\Delta p_f = kq^2 \quad (3.10)$$

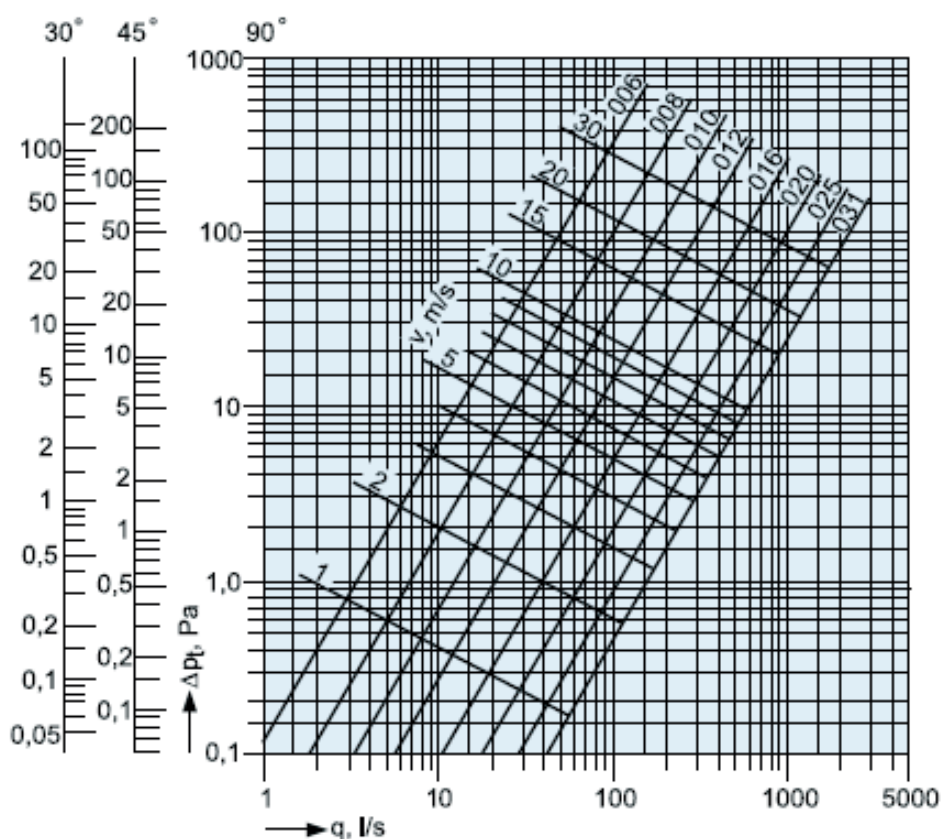
där vi enligt (3.9) har att konstanten  $k$  för sträckan  $L$  motsvaras av

$$k = \frac{8\lambda\rho L}{\pi^2 d^5} \quad (3.11)$$

### 3.3 Tryckfall i kanalböjar

Det friktionstryckfall som orsakas av kanalböjar avläses vanligen ur diagram. Det finns även andra metoder som baseras på motståndstal dessa beskrivs bland annat av (Axel Bigélius, 1974) samt (ASHRAE, 2009). Gemensamt för de olika källorna är att tryckfallet för kanalböjar kan beräknas med hjälp av ekvation (2.6) samt motståndstal.

Nedan har vi ett tryckfallsdiagram som är giltigt för kanaldimensionerna 60, 80, 100, 125, 160, 200, 250 och 315 med krökningen 30°, 45° och 90°.

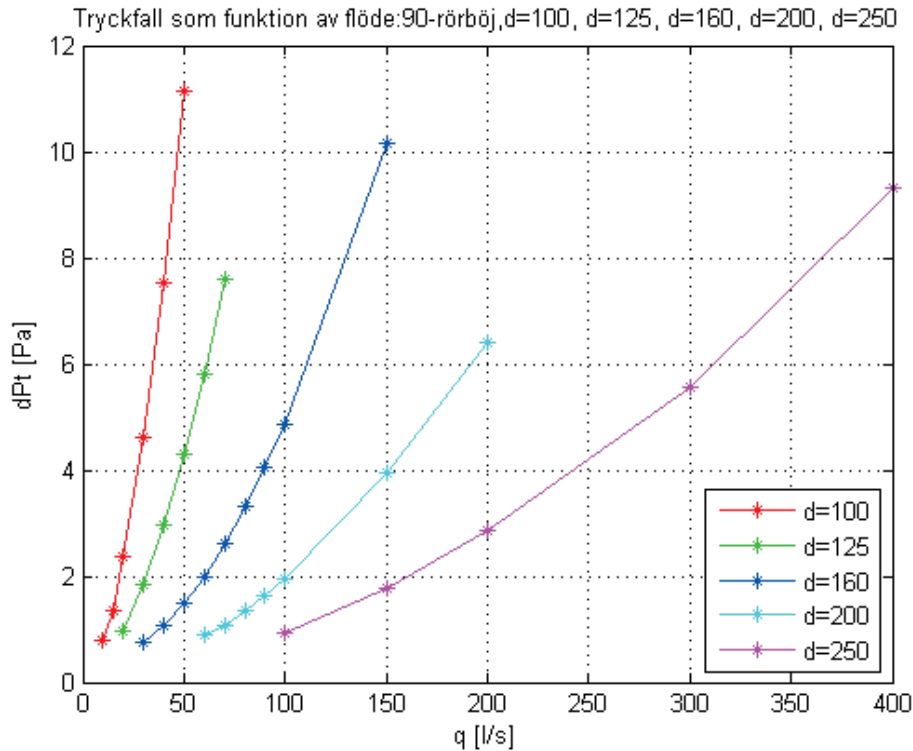


Figur 3 Tryckfallsdiagram pressad cirkulär böj, källa Swegon

### Exempel 3.2

Beräkningsuttryck för 90°-kanalböjar

Genom att avläsa<sup>4</sup> diagrammet i Figur 3: Tryckfallsdiagram pressad cirkulär böj, kan vi skapa en tabell med data för tryckfall och flöde för de olika 90°-kanalböjarna. Datapunkter ur det avlästa diagrammet kan sedan plottas varvid följande figur erhålls



Figur 4 Tryckfall som funktion av flöde för 90°-kanalböj

I Figur 4 kan vi misstänka att det råder ett exponentiellt samband mellan tryckfallet och flödet för 90°-kanalböjarna. Det borde därför vara lämpligt att göra följande ansats:

$$\Delta p_{90-böj} = c_1 q^{c_2} \quad (3.12)$$

där  $c_1$  och  $c_2$  är de konstanter som vi ska bestämma.

<sup>4</sup> Noggrann avläsning kan till exempel göras genom att vektorisera diagrammet och därefter mäta i lämpligt CAD-program.



Logaritmering av båda leden i (3.12) ger

$$\log_{10}(\Delta p_{90-b\ddot{u}j}) = \log_{10}(c_1 q^{c_2}) = \log_{10}(c_1) + c_2 \log_{10}(q) \quad (3.13)$$

Om vi jämför ovanstående samband (3.13) med räta linjens ekvation (3.14)

$$y = kx + m \quad (3.14)$$

så kan vi identifiera de olika termerna som

$$\begin{cases} y = \log_{10}(\Delta p_{90-b\ddot{u}j}) \\ k = c_2 \\ x = \log_{10}(q) \\ m = \log_{10}(c_1) \end{cases} \quad (3.15)$$

Vilket betyder att vi kan approximera en linjär funktion.

Samband (3.13) kan vi nu skriva på matrisform som

$$\begin{bmatrix} 1 & \log_{10}(q)_1 \\ 1 & \log_{10}(q)_2 \\ 1 & \log_{10}(q)_3 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \log_{10}(q)_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \log_{10}(c_1) \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log_{10}(\Delta p_{90-b\ddot{u}j})_1 \\ \log_{10}(\Delta p_{90-b\ddot{u}j})_2 \\ \log_{10}(\Delta p_{90-b\ddot{u}j})_3 \\ \vdots \\ \log_{10}(\Delta p_{90-b\ddot{u}j})_n \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

På samma sätt som ovan kan vi nu med hjälp av minsta kvadratmetoden lösa det överbestämda linjära ekvationssystemet  $\mathbf{Ax} \approx \mathbf{y}$ . Minstakvadratlösningen  $\mathbf{x}$  erhålls då som en lösning till systemet av normalekvationer.

Med insatta värden i (3.16) för 90°-kanalböjen med d=100, erhålls ekvationssystemet

$$\begin{bmatrix} 1 & 1.0000 \\ 1 & 1.1761 \\ 1 & 1.3010 \\ 1 & 1.4771 \\ 1 & 1.6021 \\ 1 & 1.6990 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \log_{10}(c_1) \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1053 \\ 0.1348 \\ 0.3724 \\ 0.6636 \\ 0.8767 \\ 1.0475 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{Ax} = \mathbf{A}^T \mathbf{y}$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1.0000 & 1.1761 & 1.3010 & 1.4771 & 1.6021 & 1.6990 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.0000 & 8.2553 \\ 8.2553 & 11.7109 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1.0000 & 1.1761 & 1.3010 & 1.4771 & 1.6021 & 1.6990 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.1053 \\ 0.1348 \\ 0.3724 \\ 0.6636 \\ 0.8767 \\ 1.0475 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.9896 \\ 4.7021 \end{bmatrix}$$

Det överbestämda linjära ekvationssystemet  $\mathbf{A}\mathbf{x} \approx \mathbf{y}$  kan nu ersättas med det bestämda linjära ekvationssystemet

$$\begin{bmatrix} 6.0000 & 8.2553 \\ 8.2553 & 11.7109 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \log_{10}(c_1) \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.9896 \\ 4.7021 \end{bmatrix}$$

Som har lösningen

$$\begin{bmatrix} \log_{10}(c_1) \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.7989 \\ 1.6696 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{-1.7989} \\ 1.6696 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0159 \\ 1.6696 \end{bmatrix}$$

Med dessa värden på de båda konstanterna insatt i (3.12) erhålls en approximationen för 90°-kanalböjen som

$$\Delta p_{90\text{-böj}, d=100} = 0.0159 q^{1.6696}$$

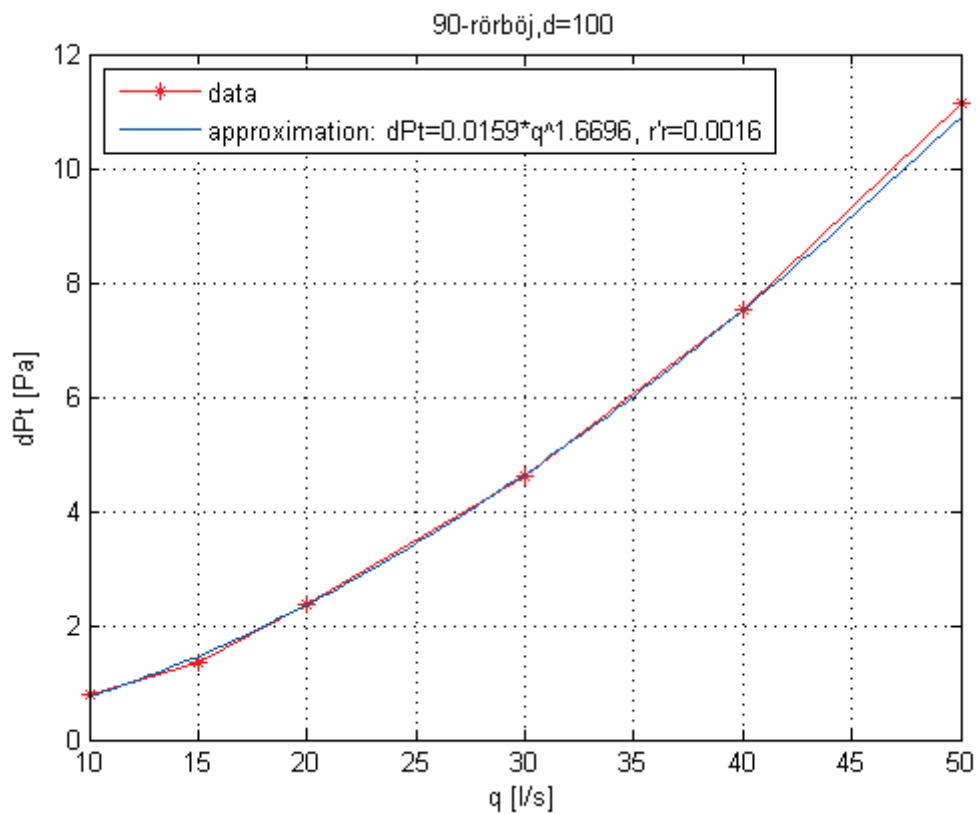
Residualvektorn erhåller vi ur ekvation (3.5) som

$$\mathbf{r} = \mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x} = \begin{bmatrix} -0.1053 \\ 0.1348 \\ 0.3724 \\ 0.6636 \\ 0.8767 \\ 1.0475 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1.0000 \\ 1 & 1.1761 \\ 1 & 1.3010 \\ 1 & 1.4771 \\ 1 & 1.6021 \\ 1 & 1.6990 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1.7989 \\ 1.6696 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0240 \\ -0.0300 \\ -0.0009 \\ -0.0037 \\ 0.0008 \\ 0.0098 \end{bmatrix}$$

Och felkvadratsumman får vi genom ekvation (3.4) som

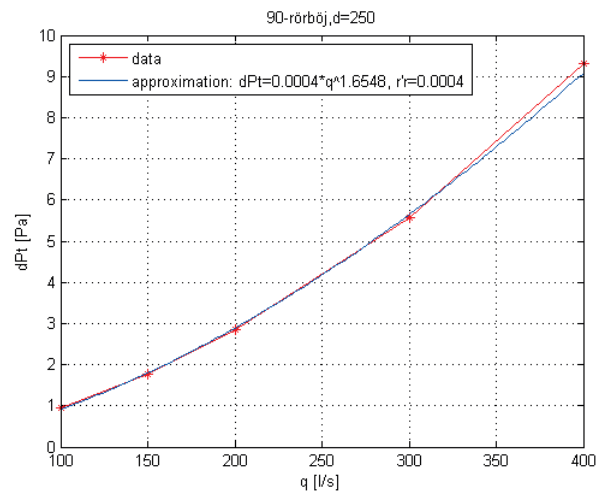
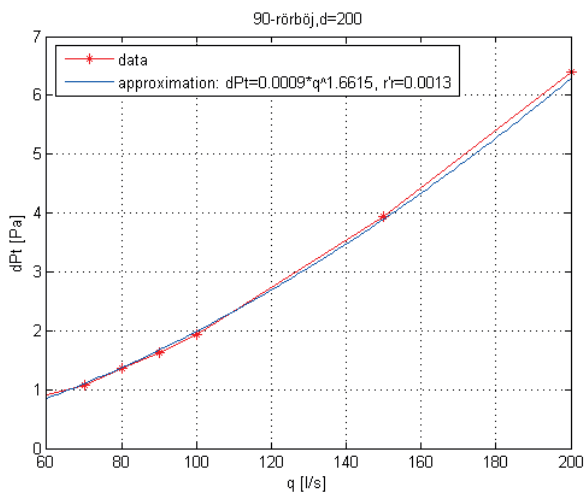
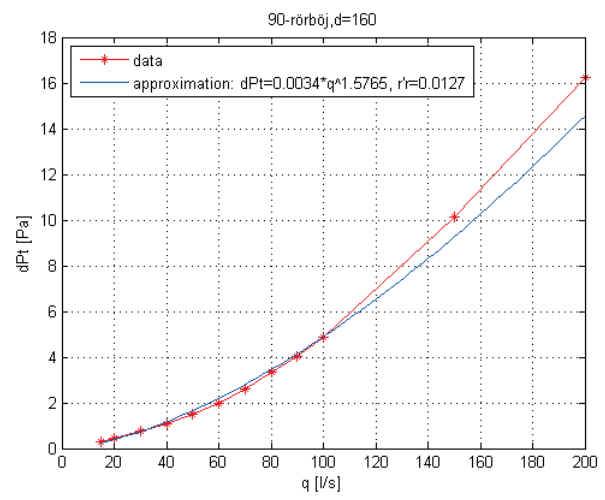
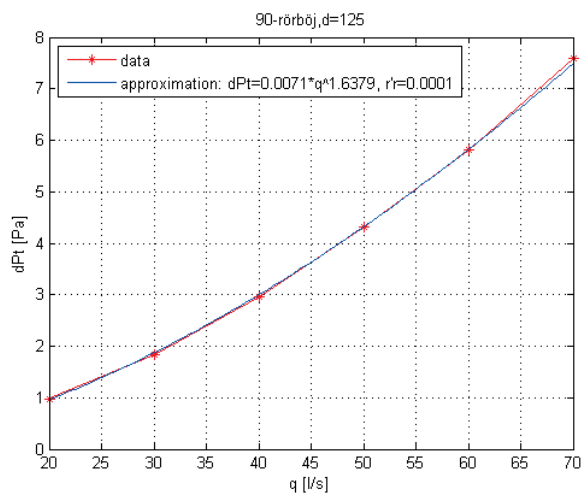
$$\sum r^2 = \mathbf{r}^T \mathbf{r} = \begin{bmatrix} 0.0240 & -0.0300 & -0.0009 & -0.0037 & 0.0008 & 0.0098 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.0240 \\ -0.0300 \\ -0.0009 \\ -0.0037 \\ 0.0008 \\ 0.0098 \end{bmatrix} = \underline{\underline{0.0016}}$$

Detta kanske är på gränsen till vad som bör accepteras för att erhålla en god approximation. Vi kan dock konstatera att de enskilda komponenterna i residualvektorn skiftar tecken på ett sätt som gör att vi har lika många datapunkter ovanför som under den approximerade kurvan, vilket gör att vi ändå kan acceptera approximationen.



Figur 5 Approximation 90°-kanalböj, d=100

Beräkningsmetodiken för de övriga 90°-kanalböjarna (d=125;160;200;250) är densamma varvid följande figurer erhålls



Rördiameter, d [mm]	Beräkningsuttryck, $\Delta p$ [Pa]; q[l/s]	Felkvadratsumma	Flödesintervall [l/s] <sup>5</sup>
100	$\Delta p_{90-böj,\phi 100} = 0.0159q^{1.6696}$	0.0016	$10 \leq q \leq 40$
125	$\Delta p_{90-böj,\phi 125} = 0.0071q^{1.6379}$	0.0001	$20 \leq q \leq 60$
160	$\Delta p_{90-böj,\phi 160} = 0.0034q^{1.5765}$	0.0127	$15 \leq q \leq 100$
200	$\Delta p_{90-böj,\phi 200} = 0.009q^{1.6615}$	0.0013	$70 \leq q \leq 150$
250	$\Delta p_{90-böj,\phi 250} = 0.0004q^{1.6648}$	0.0004	$100 \leq q \leq 300$

**Tabell 2** Sammanställning av approximativa beräkningsuttryck för 90°-kanalböj

Om vi undersöker Figur 3 närmare ser vi att tryckfallet halveras när vi går från 90°-kanalböj till 45°-kanalböj och motsvarar en tredjedel då vi går från 45°-kanalböj till 30°-kanalböj, det vill säga

$$\Delta p_{\alpha 45} = \frac{1}{2} \Delta p_{\alpha 90} \quad (3.17)$$

$$\Delta p_{\alpha 30} = \frac{1}{2} \Delta p_{\alpha 45} = \frac{1}{3} \Delta p_{\alpha 90} \quad (3.18)$$

---

<sup>5</sup> Eftersom felkvadratsumman är större än vad som kanske är önskvärt för vissa av approximationerna kan vi studera graferna och därefter definiera lämpliga intervall för respektive beräkningsuttryck. Detta är ett enkelt sätt att öka noggrannheten utan att ändra ansatsen eller antalet datapunkter vilket också innebär att vi inte behöver göra om beräkningen. Alltså gäller nu att felkvadratsumman har minskat avsevärt för samtliga beräkningsuttryck i de nya och snävare intervallen.

Med hjälp av ekvation (3.17) och (3.18) kan vi nu direkt teckna följande 15 approximativa beräkningsuttryck för de olika kanalböjarna, utan ytterligare approximationer<sup>6</sup>.

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_{\alpha 90, \phi 100} &= 0.0159 q^{1.6696} \\ \Delta p_{\alpha 45, \phi 100} &= \frac{1}{2} 0.0159 q^{1.6696} \\ \Delta p_{\alpha 30, \phi 100} &= \frac{1}{3} 0.0159 q^{1.6696} \end{aligned} \right\} 10 \leq q \leq 40 \text{ [l/s]} \quad (3.19)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_{\alpha 90, \phi 125} &= 0.0071 q^{1.6379} \\ \Delta p_{\alpha 45, \phi 125} &= \frac{1}{2} 0.0071 q^{1.6379} \\ \Delta p_{\alpha 30, \phi 125} &= \frac{1}{3} 0.0071 q^{1.6379} \end{aligned} \right\} 20 \leq q \leq 60 \text{ [l/s]} \quad (3.20)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_{\alpha 90, \phi 160} &= 0.0034 q^{1.5765} \\ \Delta p_{\alpha 45, \phi 160} &= \frac{1}{2} 0.0034 q^{1.5765} \\ \Delta p_{\alpha 30, \phi 160} &= \frac{1}{3} 0.0034 q^{1.5765} \end{aligned} \right\} 15 \leq q \leq 100 \text{ [l/s]} \quad (3.21)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_{\alpha 90, \phi 100} &= 0.009 q^{1.6615} \\ \Delta p_{\alpha 45, \phi 200} &= \frac{1}{2} 0.009 q^{1.6615} \\ \Delta p_{\alpha 30, \phi 200} &= \frac{1}{3} 0.009 q^{1.6615} \end{aligned} \right\} 70 \leq q \leq 150 \text{ [l/s]} \quad (3.22)$$

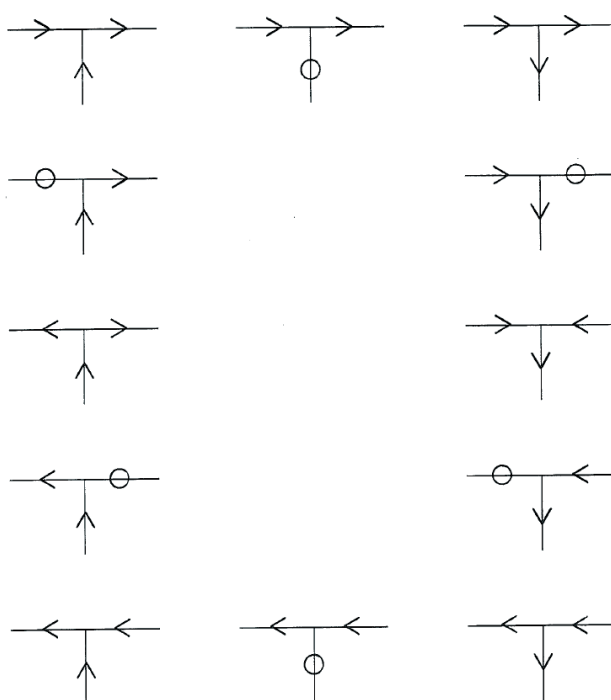
$$\left. \begin{aligned} \Delta p_{\alpha 90, \phi 250} &= 0.0004 q^{1.6648} \\ \Delta p_{\alpha 45, \phi 250} &= \frac{1}{2} 0.0004 q^{1.6648} \\ \Delta p_{\alpha 30, \phi 250} &= \frac{1}{3} 0.0004 q^{1.6648} \end{aligned} \right\} 100 \leq q \leq 300 \text{ [l/s]} \quad (3.23)$$

---

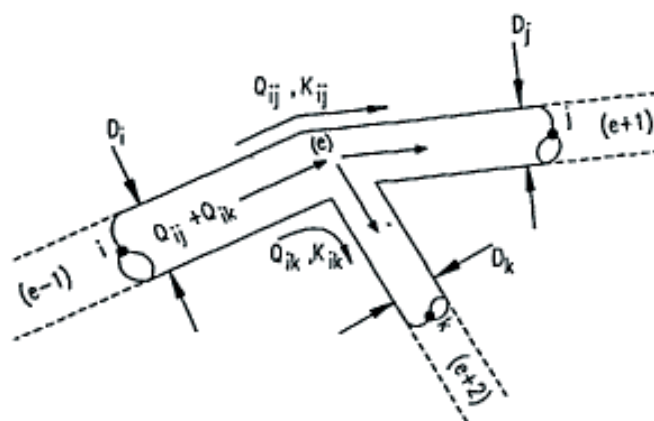
<sup>6</sup> Det skulle här alltså vara möjligt att på motsvarande sätt som tidigare göra en ansats och därefter ta fram approximativa beräkningsuttryck som även beskriver tryckfallets variation med avseende på godtycklig vinkel för kanalböjen. Detta skulle visserligen reducerat antalet ekvationer men hade då samtidigt minskat noggrannheten ytterligare. Med detta som bakgrund kan vi nöja oss med ovan beskrivna samband.

### 3.4 Tryckfall i T-stycke

Tryckfallet i T-stycke är olika stort i de olika grenarna. Det finns många utredningar (Jensen, Krav på tryckfallsfunktioner för grenstycken, Rapport TVIT--07/7019, 2007), (Jensen, Installationstekniska beräkningar med PFS, 2007), (Haghigi, Mohtar, Bralts, & Segerlind, 1991), (Kocovic & Fält, 2004) med flera, vilka sammantaget visar på att det inte är ett alldeles triviale problem att generalisera beräkningsuttryck för T-stycke. En av de enklare metoderna, som används här, baseras på motståndstal (ASHRAE, 2009) enligt principen som beskrivs av ekvation (2.8).



Figur 6 Olika strömningsfall för T-stycke. Ring markerar nollflöde, (Jensen, 1995)



Figur 7 Beräkningsmodell av T-stycke, (Haghigi, Mohtar, Bralts & Segerlind, 1991).





## 4 Beräkningsmetoder

De olika beräkningsmetoder, som vi har att välja mellan, kan enkelt delas in i handberäkningsmetoder respektive datorberäkningsmetoder. Vanligtvis brukar man dimensionera kanalsystem baserat på någon av följande principer (Warfvinge & Dahlblom, 2010).

- Konstant tryckfall
- Konstant hastighet
- Konstant diameter

Här kommer genomgående principen *Konstant tryckfall* att användas.

### 4.1 Handberäkning

De två handberäkningsmetoder som exemplifieras här är en tabellmetod och en diagrammetod. Den metod som lärs ut på LTH idag är en *diagrammetod* som även används i industrin. Metoden är baserad på data från svensktillverkade produkter såsom kanaler och anslutningar. Den här beskrivna *tabellmetoden* är baserad på amerikanska produkter.

#### 4.1.1 Tabellmetod

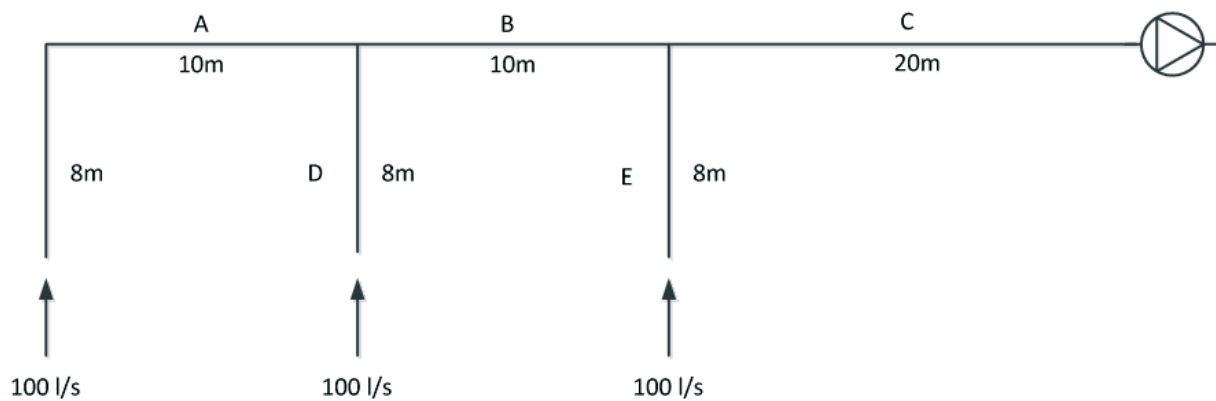
Den metod som beskrivs här baseras på specifikationer från den amerikanska organisationen ASHRAE<sup>7</sup>. Organisationen ger ut *ASHRAE Handbook* (ASHRAE, 2009) som bland annat innehåller beräkningsmetoder för ventilationskanaler och anslutningar baserade på *ASHRAE Duct fitting database*. ASHRAE Handbook kan närmast jämföras med den svenska motsvarigheten, VVS-handboken (Bigélius & Svennberg, 1974).

---

<sup>7</sup> ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers), grundat 1894, är en amerikansk byggnadsteknisk förening med mer än 50 000 medlemmar världen över. Föreningen och dess medlemmar fokuserar på installationsteknik, energieffektivitet, inomhusluftens kvalitet och hållbarhet inom industrin. Detta sker genom forskning, författande av standarder, publicering av artiklar och rapporter samt fortbildning (<http://www.ashrae.org/>).

## Exempel 4.1

Analys av ett 3-grenat frånluftsventilationssystem.



För att kunna tillämpa metoden behöver vi först dimensionera kanalerna. Dimensionering kan göras med följande antaganden

- Maximalt tryckfall på 2 Pa/m för alla kanaler
- Friktionsmotståndet är 0.02 för alla kanaler

### Flödesberäkning

Enligt ekvation (2.1) ovan har vi att

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{ut}$$

Vilket direkt ger oss

$$q_C = q_A + q_D + q_E = 100 + 100 + 100 = \underline{\underline{300 \text{ l/s}}}$$

$$q_B = q_A + q_D = 100 + 100 = \underline{\underline{200 \text{ l/s}}}$$

## Dimensionering

Beräkningsmetodik enligt ASHRAE baserar sig på *Darcy-Colebrook*'s ekvation, vilken beräknar det  $\lambda$  vi här har antagit till 0.02. Skillnaden för den tillämpning som beskrivs här är marginell och vi kan därför använda ekvation (2.4) direkt.

Enligt ekvation (2.4) Darcy-Weisbach har vi att

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_f &= \frac{\lambda L \rho v^2}{d \cdot 2} = \frac{\lambda L \rho}{d \cdot 2} \left( \frac{4q}{\pi d^2} \right)^2 = \frac{\lambda L \rho}{d \cdot 2} \frac{16q^2}{\pi^2 d^4} = \frac{8\lambda L \rho}{\pi^2 d^5} q^2 \\ q &= vA = v \frac{\pi d^2}{4} \Leftrightarrow v = \frac{4q}{\pi d^2} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow d = \left( \frac{8\lambda L \rho}{\pi^2 \Delta p_f} q^2 \right)^{1/5}$$

För kanal A beräknas diametern vilket ger dimensionerande diameter

$$d_A = \left( \frac{8\lambda L_A \rho}{\pi^2 \Delta p_{fA}} q_A^2 \right)^{1/5} = \left( \frac{8 \cdot 0.02 \cdot 1 \cdot 1.2}{\pi^2 \cdot 2} 0.100^2 \right)^{1/5} = 0.158 \text{ m} \Rightarrow d_{\text{dim},A} = \underline{\underline{0.160 \text{ m}}}$$

För kanal B beräknas diametern vilket ger dimensionerande diameter<sup>8</sup>

$$d_B = \left( \frac{8\lambda L_B \rho}{\pi^2 \Delta p_{fB}} q_B^2 \right)^{1/5} = \left( \frac{8 \cdot 0.02 \cdot 1 \cdot 1.2}{\pi^2 \cdot 2} 0.200^2 \right)^{1/5} = 0.208 \text{ m} \Rightarrow d_{\text{dim},B} = \underline{\underline{0.250 \text{ m}}}$$

För kanal C beräknas diametern vilket ger dimensionerande diameter

$$d_C = \left( \frac{8\lambda L_C \rho}{\pi^2 \Delta p_{fC}} q_C^2 \right)^{1/5} = \left( \frac{8 \cdot 0.02 \cdot 1 \cdot 1.2}{\pi^2 \cdot 2} 0.300^2 \right)^{1/5} = 0.245 \text{ m} \Rightarrow d_{\text{dim},C} = \underline{\underline{0.250 \text{ m}}}$$

Flödet är det samma i kanal D och E som i kanal A vilket gör att dimensionen här blir den samma, det vill säga

$$d_A = d_D = d_E = 0.158 \text{ m} \Rightarrow d_{\text{dim},A} = d_{\text{dim},D} = d_{\text{dim},E} = \underline{\underline{0.160 \text{ m}}}$$

---

<sup>8</sup> Här hade vi kunnat välja en 200-kanal men för att undvika för många olika dimensioner använder vi en 250-kanal. Detta förenklar både *mängdning* och montage. Andra argument som kan tala för att inte byta dimension är att hastigheten hålls konstant vilket minskar buller och därmed energiåtgången för att driva systemet.

## Tryckfallsberäkning

Om vi ska ta hänsyn till tryckfallet orsakat av 90-böjen och T-stycken behöver vi beräkningsuttryck för detta. För att lösa uppgiften i detta exempel kan vi använda oss av en metod som finns beskriven i ASHRAE Handbook. Metoden baseras på motståndstal och beskrivs här med följande exempel.

Med nu kända kanaldimensioner kan vi nu beräkna:

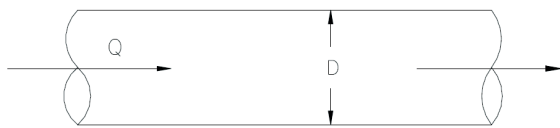
- Motståndstal
- Tryckfall

Med hjälp av ekvationerna (2.3), (2.4), (2.6), (2.8), (2.9) och (2.10) kan vi nu teckna beräkningsuttrycken för tryckfallet i de olika sträckorna.

### Sträcka A-B-C:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta p_{tot,A-B-C} = \Delta p_{don,A} + (\sum \Delta p_f)_{A-B-C} + (\sum \Delta p_e)_{A-B-C} \\ \text{där} \\ (\sum \Delta p_e)_{A-B-C} = \zeta_{90\text{-böj}} p_{v,A} + \underbrace{\zeta_{c,s} p_{v,B}}_{\substack{T\text{-stycke 1,} \\ \text{genomströmning}}} + \underbrace{\zeta_{c,s} p_{v,C}}_{\substack{T\text{-stycke 2,} \\ \text{genomströmning}} \end{array} \right.$$

### Tryckfallet för de raka kanalerna

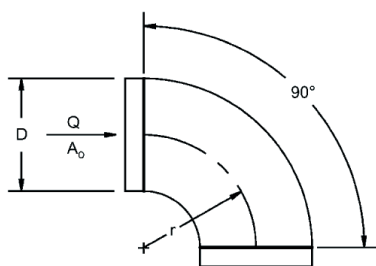


$$\left. \begin{aligned} (\sum \Delta p_f)_{A-B-C} &= \Delta p_{f,A} + \Delta p_{f,B} + \Delta p_{f,C} \\ \text{där} \\ \Delta p_{f,A} &= \frac{8\lambda L_A \rho}{\pi^2 d_A^5} q_A^2 \\ \Delta p_{f,B} &= \frac{8\lambda L_B \rho}{\pi^2 d_B^5} q_B^2 \\ \Delta p_{f,C} &= \frac{8\lambda L_C \rho}{\pi^2 d_C^5} q_C^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow (\sum \Delta p_f)_{A-B-C} = \frac{8\lambda \rho}{\pi^2} \left( \frac{L_A q_A^2}{d_A^5} + \frac{L_B q_B^2}{d_B^5} + \frac{L_C q_C^2}{d_C^5} \right) =$$

$$= \frac{8 \cdot 0.02 \cdot 1.2}{\pi^2} \left( \frac{(8 + 10) 0.100^2}{0.160^5} + \frac{10 \cdot 0.200^2}{0.250^5} + \frac{20 \cdot 0.300^2}{0.250^5} \right) =$$

$$= 33.394 + 7.968 + 35.857 = \underline{\underline{77.22 \text{ Pa}}}$$

### Tryckfallet för 90-böjen



Om vi använder tabell CD3-1 enl. bilaga, ASHRAE Handbook, kan vi interpolera fram värdet för motståndstalet  $C_0$ . Med diametern 160 mm får vi tryckfallet för 90-böjen som

$$\Delta p_{e,90-böj} = \zeta_{90-böj} p_{v,0} = C_0 p_{v,0} = C_0 \frac{8\rho}{\pi^2 D^4} Q^2 =$$

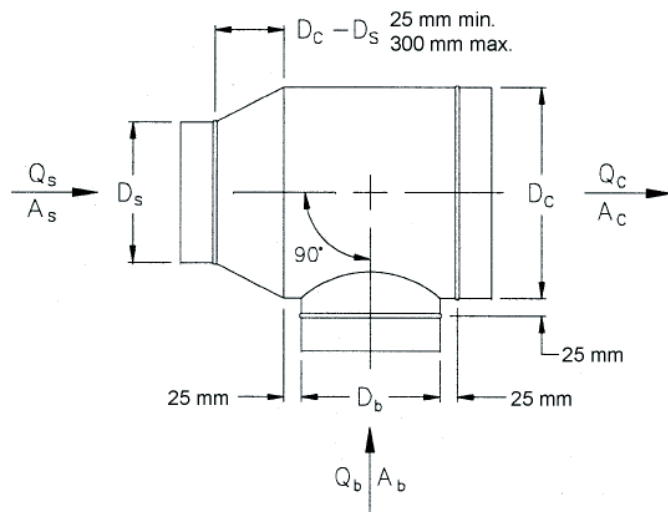
$$= 0.133 \cdot \frac{8 \cdot 1.2}{\pi^2 0.160^4} 0.100^2 = \underline{\underline{1.97 \text{ Pa}}}$$

Detta tryckfall kan vi jämföra med det som erhålls om vi istället hade valt den segmentuppbyggda CD3-9-böjen. Med i övrigt samma förutsättningar erhålls då ett motståndstal  $C_0 = 0.271$  som i princip är dubbelt så stort, vilket ger oss ett betydligt högre tryckfall.

Om vi vill reducera tryckfallet i kanalerna och därmed energiförbrukning, är det viktigt att välja komponenter med en geometri som minimerar friktionen.

### Tryckfall i T-stycke 1

Om vi använder tabell ED5-3 enl. bilaga,



ASHRAE Handbook, kan vi beräkna tryckfallet för både genomlopp och påstick som:

$$\Delta p_{t,s} = C_s \frac{8\rho}{\pi^2 D_s^4} Q_s^2$$

$$\Delta p_{t,b} = C_b \frac{8\rho}{\pi^2 D_b^4} Q_b^2$$

För att beräkna motståndstalen  $C_s$  och  $C_b$  behöver vi först beräkna tvärsnitts- och flödeskvoter eftersom dessa värden utgör inparametrar till tabellen.

$$\frac{A_s}{A_c} = \frac{A_b}{A_c} = \frac{\frac{\pi}{4} d_s^2}{\frac{\pi}{4} d_c^2} = \frac{0.160^2}{0.250^2} = 0.410$$

$$\frac{Q_s}{Q_c} = \frac{Q_b}{Q_c} = \frac{0.100}{0.200} = 0.5$$

Ur tabell ED5-3 enl. bilaga,

ASHRAE Handbook, kan vi nu interpolera fram värden för motståndstalen för både genomlopp och påstick. Vi erhåller då:

$$C_s = C_s \left( \frac{A_s}{A_c}, \frac{A_b}{A_c}, \frac{Q_s}{Q_c} \right) = 1.154$$

$$C_b = C_b \left( \frac{A_s}{A_c}, \frac{A_b}{A_c}, \frac{Q_b}{Q_c} \right) = 1.189$$

Vilket ger tryckfallet för T-stycke 1 som

$$\Delta p_{t1,s} = C_s \frac{8\rho}{\pi^2 D_s^4} Q_s^2 = 1.154 \frac{8 \cdot 1.2}{\pi^2 0.160^4} 0.100^2 = \underline{\underline{17.13 Pa}}$$

$$\Delta p_{t1,b} = C_b \frac{8\rho}{\pi^2 D_b^4} Q_b^2 = 1.189 \frac{8 \cdot 1.2}{\pi^2 0.160^4} 0.100^2 = \underline{\underline{17.65 Pa}}$$

### Tryckfall i T-stycke 2

På motsvarande sätt tar vi fram tvärsnitts- och flödeskvoter för T-stycke 2

$$\frac{A_s}{A_c} = \frac{\frac{\pi}{4} d_s^2}{\frac{\pi}{4} d_c^2} = \frac{0.250^2}{0.250^2} = 1, \quad \frac{A_b}{A_c} = \frac{\frac{\pi}{4} d_b^2}{\frac{\pi}{4} d_c^2} = \frac{0.160^2}{0.250^2} = 0.410$$

$$\frac{Q_s}{Q_c} = \frac{0.200}{0.300} = 0.667, \quad \frac{Q_b}{Q_c} = \frac{0.100}{0.300} = 0.333$$

Ur tabell ED5-3 enl. bilaga, ASHRAE Handbook, kan vi nu interpolera fram värden för motståndstalen för både genomlopp och påstick. Vi erhåller då:

$$C_s = C_s \left( \frac{A_s}{A_c}, \frac{A_b}{A_c}, \frac{Q_s}{Q_c} \right) = 1.014$$

$$C_b = C_b \left( \frac{A_s}{A_c}, \frac{A_b}{A_c}, \frac{Q_b}{Q_c} \right) = 0.864$$

Vilket ger tryckfallet för T-stycke 2 som

$$\Delta p_{t2,s} = C_s \frac{8\rho}{\pi^2 D_s^4} Q_s^2 = 1.014 \frac{8 \cdot 1.2}{\pi^2 0.250^4} 0.200^2 = \underline{\underline{10.10 Pa}}$$

$$\Delta p_{t2,b} = C_b \frac{8\rho}{\pi^2 D_b^4} Q_b^2 = 0.864 \frac{8 \cdot 1.2}{\pi^2 0.160^4} 0.100^2 = \underline{\underline{12.82 Pa}}$$

Och slutligen kan vi beräkna tryckfallet för sträckan A-B-C som

$$\begin{aligned} \Delta p_{tot,A-B-C} &= \Delta p_{don,A} + \left( \sum \Delta p_f \right)_{A-B-C} + \left( \sum \Delta p_e \right)_{A-B-C} = \\ &= \Delta p_{don,A} + \left( \sum \Delta p_f \right)_{A-B-C} + \Delta p_{t1,s} + \Delta p_{t2,s} = \\ &= 20 + 77.22 + (1.97 + 17.13 + 10.1) = 20 + 77.22 + 29.20 = \underline{\underline{126.4 Pa}} \end{aligned}$$

### **Sträcka D-B-C**

Förfarandet att beräkna tryckfallet för sträckan D-B-C blir det samma som för sträckan A-B-C och ges av sambandet

$$\Delta p_{tot,D-B-C} = \Delta p_{don,D} + (\sum \Delta p_f)_{D-B-C} + (\sum \Delta p_e)_{D-B-C}$$

Lyckligtvis har vi redan beräknat de flesta värden som behövs. Det enda som vi saknar är tryckfallet för raksträckan D, som ges av

$$\Delta p_{f,D} = \frac{8\lambda L_D \rho}{\pi^2 d_D^5} q_D^2 = \frac{8 \cdot 0.02 \cdot 8 \cdot 1.2}{\pi^2 0.160^5} \cdot 0.100^2 = 14.84 \text{ Pa}$$

Med de sedan tidigare beräknade värdena erhålls det totala tryckfallet för sträckan D-B-C som

$$\begin{aligned} \Delta p_{tot,D-B-C} &= \Delta p_{don,D} + (\sum \Delta p_f)_{D-B-C} + (\sum \Delta p_e)_{D-B-C} = \\ &= 20 + (14.84 + 7.968 + 35.857) + (17.65 + 12.82) = 20 + 58.665 + 30.47 = \underline{\underline{109.14 \text{ Pa}}} \end{aligned}$$

### **Sträcka E-C**

Med samma resonemang som ovan kan vi teckna det totala tryckfallet för sträckan E-C som

$$\Delta p_{tot,E-C} = \Delta p_{don,E} + (\sum \Delta p_f)_{E-C} + (\sum \Delta p_e)_{E-C}$$

Tryckfallet för raksträckan E ges av

$$\Delta p_{f,E} = \frac{8\lambda L_E \rho}{\pi^2 d_E^5} q_E^2 = \frac{8 \cdot 0.02 \cdot 8 \cdot 1.2}{\pi^2 0.160^5} \cdot 0.100^2 = \underline{\underline{14.84 \text{ Pa}}}$$

Och vi har således att det totala tryckfallet för sträckan E-C blir

$$\begin{aligned} \Delta p_{tot,E-C} &= \Delta p_{don,E} + (\sum \Delta p_f)_{E-C} + (\sum \Delta p_e)_{E-C} = \\ &= 20 + (14.84 + 35.857) + 12.82 = 20 + 50.697 + 12.82 = \underline{\underline{83.52 \text{ Pa}}} \end{aligned}$$



## 4.1.2 Diagrammetod

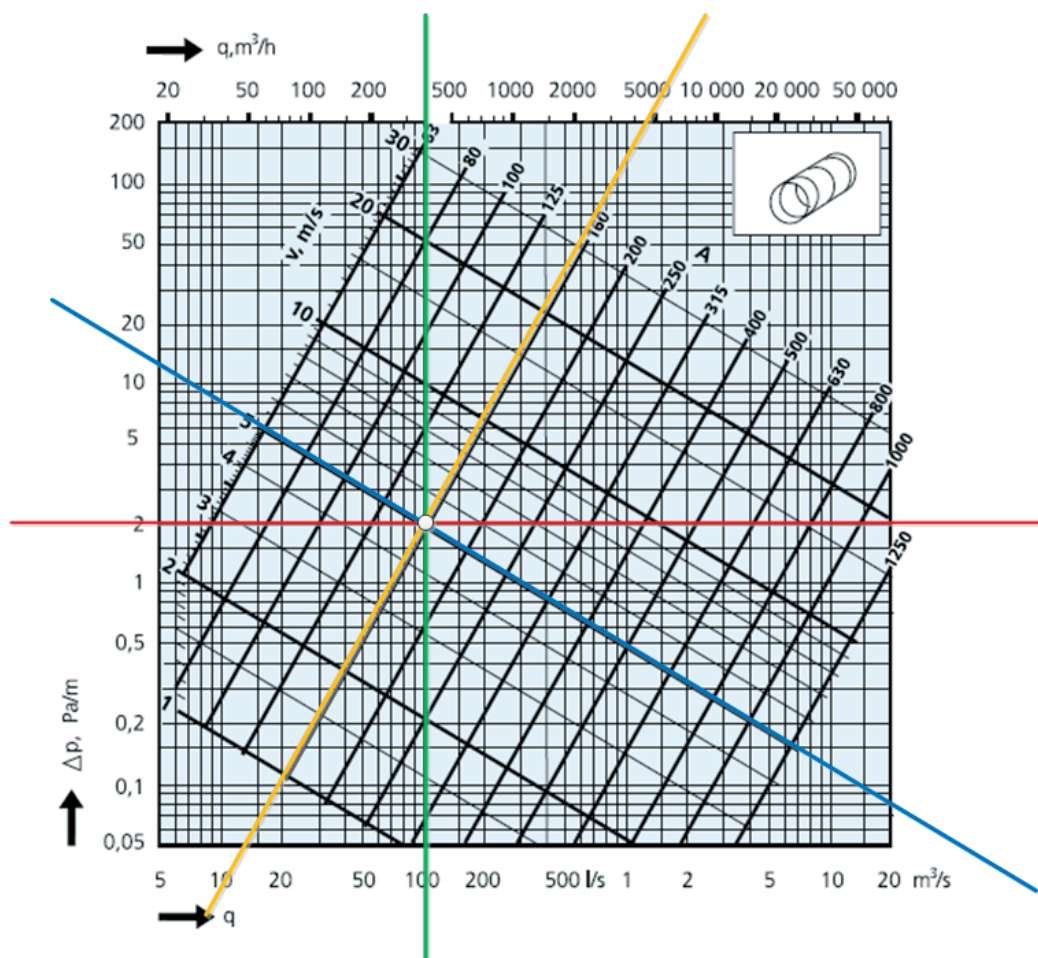
Metoden är antagligen den mest kända i Sverige och baseras på diagram från svenska tillverkare. Detta är också den metod som lärs ut vid LTH idag.

### Exempel 4.2

Med samma förutsättningar som Exempel 4.1 ska vi beräkna:

- Kanaldimensioner
- Tryckfall och flöde för fläkten

#### Raka kanaler



Figur 8 Tryckfallsdiagram för spiralfalsade raka cirkulära kanaler

Enligt förutsättningarna har vi en begränsning på ett maximalt tryckfall på 2 Pa/m (vilket motsvaras av den röda linjen). Om vi börjar med kanal A med flödet och trycket som inparametrar, kan vi ur diagrammet avläsa skärningspunkten (mellan röd och grön linje) och konstatera att dimensionen ligger strax under 160 mm samt att hastigheten (blå linje) i skärningspunkten är ungefär 5 m/s.

Alltså har vi för kanal A att

$$\begin{array}{ccc} \overbrace{q = 100 \text{ l/s}}^{\text{Inparametrar}} & \xRightarrow{\text{diagramavläsning}} & \overbrace{d = 160 \text{ mm}}^{\text{Utparametrar}} \\ \overbrace{R = 2 \text{ Pa/m}} & & \overbrace{v = 5 \text{ m/s}} \end{array}$$

Här betecknar vi det specifika tryckfallet med  $R$  [Pa/m] för att skilja det från tryckfallet  $\Delta p$  [Pa]. För övriga kanaler B, C, D och E är förfarandet det samma med målsättningen att skärningspunkten ska ligga under den röda 2 Pa/m -linjen.

Enligt förutsättningar samt avläsning ur diagram kan vi sammanfatta beräkningarna i följande tabell:

Beteckning	Flöde [l/s]	Dimension [mm]	R [Pa/m]	V [m/s]	L [m]	RL [Pa]
A	100	160	2.00	5.0	18.0	36.0
B	200	250	0.75	4.0	10.0	7.5
C	300	250	1.60	6.1	20.0	32.0
D	100	160	2.00	5.0	8.0	16.0
E	100	160	2.00	5.0	8.0	16.0

**Tabell 3** Sammanfattning av beräkningarna från diagrammetod

Enligt ekvation (2.1) ovan har vi, precis som tidigare, att

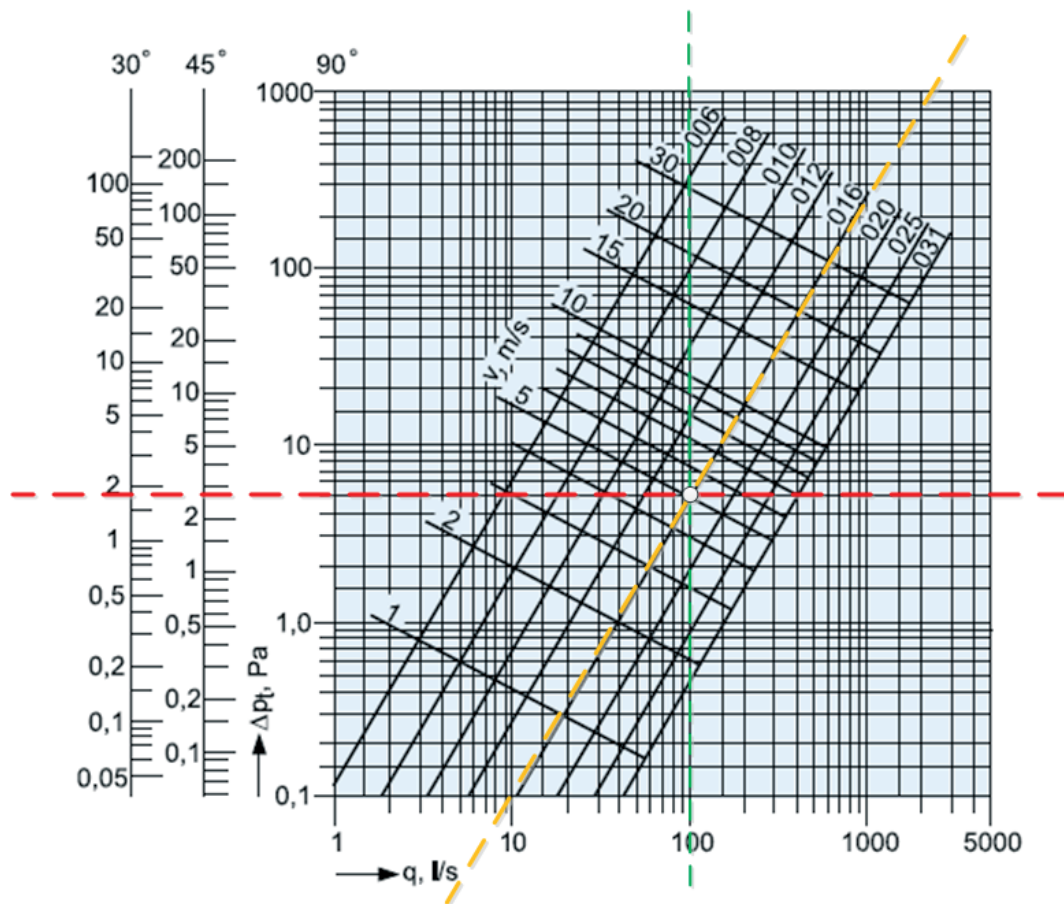
$$\sum Q_{in} = \sum Q_{ut}$$

Vilket direkt ger oss

$$q_C = q_A + q_D + q_E = 100 + 100 + 100 = \underline{\underline{300 \text{ l/s}}}$$

$$q_B = q_A + q_D = 100 + 100 = \underline{\underline{200 \text{ l/s}}}$$

## 90°-bøj



Figur 9 Tryckfallsdiagram för pressad cirkulär bøj

För kanal A med flödet och dimensionen (alternativt hastigheten) som inparametrar kan vi ur diagrammet avläsa skärningspunkten (mellan grön och gul linje) vilket ger oss tryckfallet (röd linje) i skärningspunkten som är ungefär 5 Pa för 90°-böjen<sup>9</sup>.

Med hänsyn tagen till tryckfall i 90°-böjen har vi för kanal A:

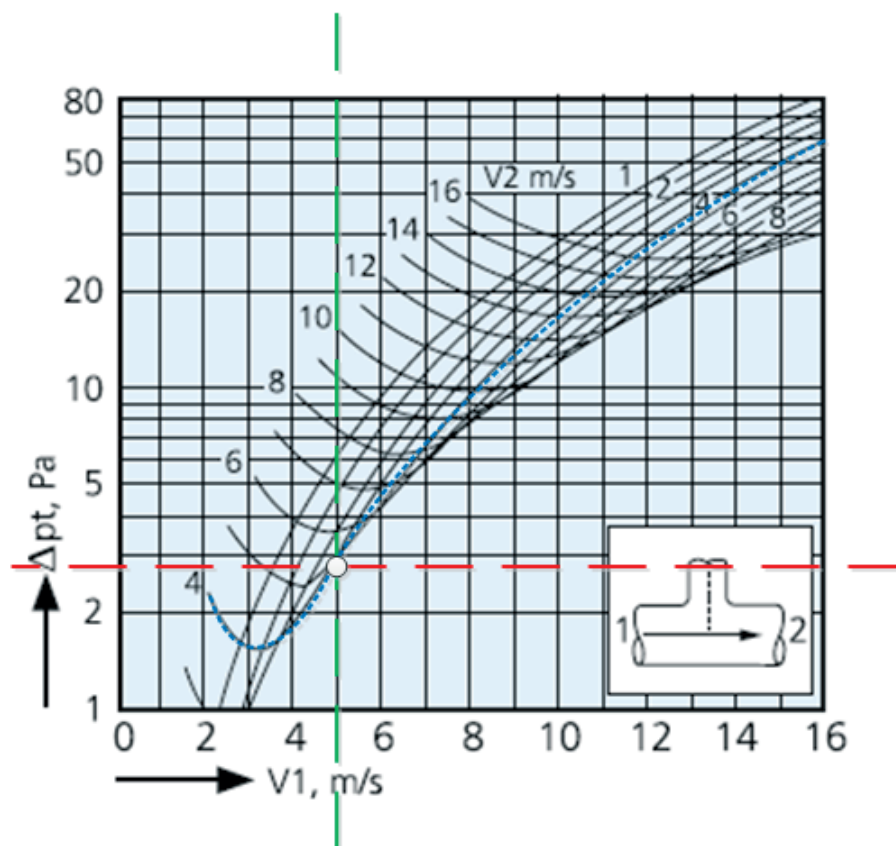
$$\overbrace{q = 100 \text{ l / s}}^{\text{Inparametrar}} \quad \xRightarrow{\text{diagramavläsning}} \quad \overbrace{\Delta p_t = 5.0 \text{ Pa}}^{\text{Utparametrar}}$$

$$d = 160 \text{ mm}$$

$$\left( \text{alt. } v = 5 \text{ m / s} \right)$$

<sup>9</sup> Vi kan ur diagrammet också konstatera att om vi hade haft en 45°-bøj så hade vi erhållit hälften så stort tryckfall och om vi hade haft en 30°-bøj hade vi erhållit 1/3 av tryckfallet för 90°-böjen.

## T-stycken



Figur 10 Tryckfallsdiagram för cirkulära T-stycken, genomströmning

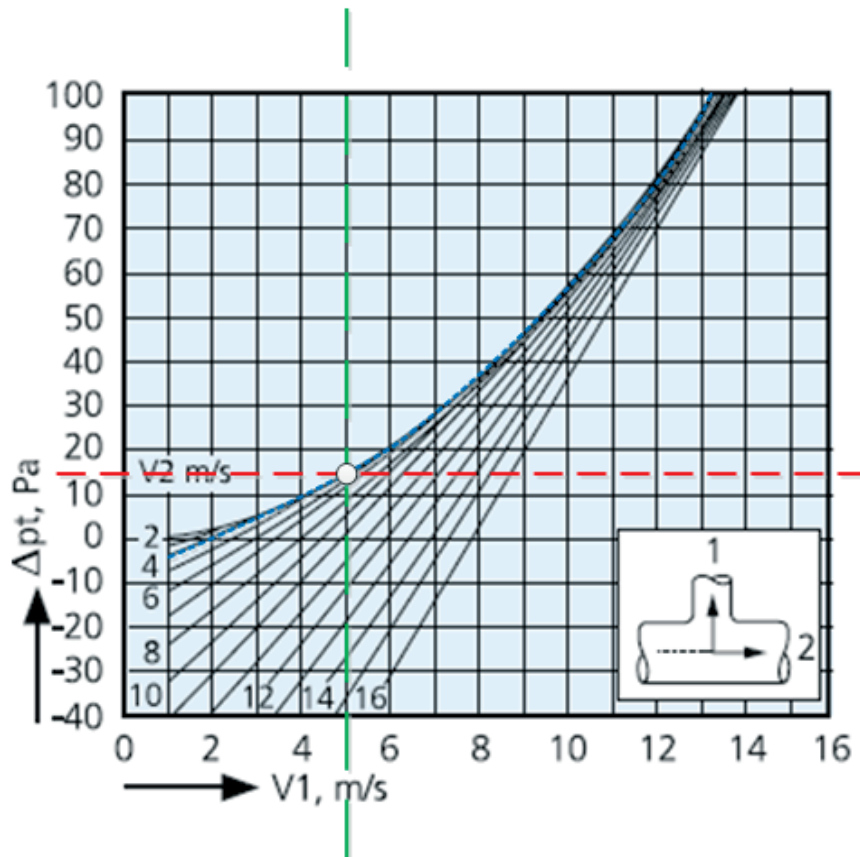
Det första T-stycket räknat från don A mot fläkt i strömningsriktningen ger med in parametrar hastigheten i kanal A samt hastigheten i kanal B, det vill säga hastighet före och efter T-stycket, skärningspunkten (mellan grön och blå kurva) tryckfallet ungefär 2.6 Pa.

$$\begin{array}{ccc} \overbrace{v_A = 5.0 \text{ m/s}}^{\text{Inparametrar}} & \xrightarrow{\text{diagramavläsning}} & \overbrace{\Delta p_t = 2.6 \text{ Pa}}^{\text{Utparametrar}} \\ v_B = 4.0 \text{ m/s} & & \end{array}$$

På samma sätt erhåller vi för det andra T-stycket vid genomströmning

$$\begin{array}{ccc} \overbrace{v_B = 4.0 \text{ m/s}}^{\text{Inparametrar}} & \xrightarrow{\text{diagramavläsning}} & \overbrace{\Delta p_t = 5.5 \text{ Pa}}^{\text{Utparametrar}} \\ v_C = 6.1 \text{ m/s} & & \end{array}$$

Eftersom vi har olika tryckfall i T-stycken beroende på strömningsriktning i T-styckets grenar behöver vi även avläsa tryckfallet för påstick.



Figur 11 Tryckfallsdiagram för cirkulära T-stycke, påstick

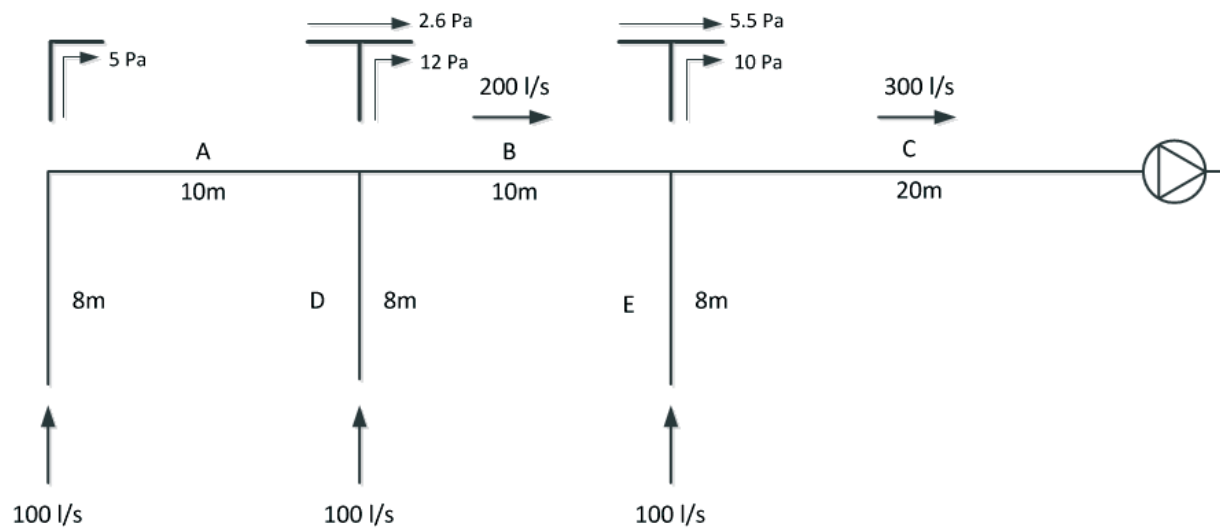
Det första T-stycket räknat från don A mot fläkt i strömningsriktningen, ger med inparametrar hastigheten i kanal D samt hastigheten i kanal B, det vill säga hastighet före och efter T-stycket, skärningspunkten (mellan grön och blå kurva) tryckfallet ungefär 12 Pa.

$$\begin{array}{ccc} \overbrace{v_D = 5.0 \text{ m/s}}^{\text{Inparametrar}} & \xRightarrow{\text{diagramavläsning}} & \overbrace{\Delta p_t = 12.0 \text{ Pa}}^{\text{Utparametrar}} \\ v_B = 4.0 \text{ m/s} & & \end{array}$$

På samma sätt erhåller vi för det andra T-stycket vid påstick

$$\begin{array}{ccc} \overbrace{v_E = 5.0 \text{ m/s}}^{\text{Inparametrar}} & \xRightarrow{\text{diagramavläsning}} & \overbrace{\Delta p_t = 10.0 \text{ Pa}}^{\text{Utparametrar}} \\ v_C = 6.1 \text{ m/s} & & \end{array}$$

När diagrammen är avlästa kan vi sammanfatta i följande figur och tabell (samma som ovan)



Beteckning	Flöde [l/s]	Dimension [mm]	R [Pa/m]	V [m/s]	L [m]	RL [Pa]
A	100	160	2.00	5.0	18.0	36.0
B	200	250	0.75	4.0	10.0	7.5
C	300	250	1.60	6.1	20.0	32.0
D	100	160	2.00	5.0	8.0	16.0
E	100	160	2.00	5.0	8.0	16.0

**Tabell 4** Sammanfattning av beräkningar för diagrammetod

Slutligen kan vi beräkna det totala tryckfallet för de olika delsträckorna med hjälp av ekvation (2.3) där vi utnyttjar ekvation (3.7) samt de ur diagrammen avlästa engångstryckfallen.

### **Sträcka A-B-C**

$$\begin{aligned}\Delta p_{tot,A-B-C} &= \Delta p_{don} + \overbrace{R_A L_A + R_B L_B + R_C L_C}^{\Delta p_f} + (\sum \Delta p_e) = \\ &= 20 + 36 + 7.5 + 32 + (5.0 + 2.6 + 5.5) = 95.5 + 13.1 = \underline{\underline{108.6 Pa}}\end{aligned}$$

### **Sträcka D-B-C**

$$\begin{aligned}\Delta p_{tot,D-B-C} &= \Delta p_{don} + R_D L_D + R_B L_B + R_C L_C + (\sum \Delta p_e) = 20 + 16 + 7.5 + 32 + (12 + 5.5) = \\ &= 75.5 + 17.5 = \underline{\underline{93 Pa}}\end{aligned}$$

### **Sträcka E-C**

$$\Delta p_{tot,E-C} = \Delta p_{don} + R_E L_E + R_C L_C + (\sum \Delta p_e) = 20 + 16 + 32 + (10) = 68 + 10 = \underline{\underline{78 Pa}}$$

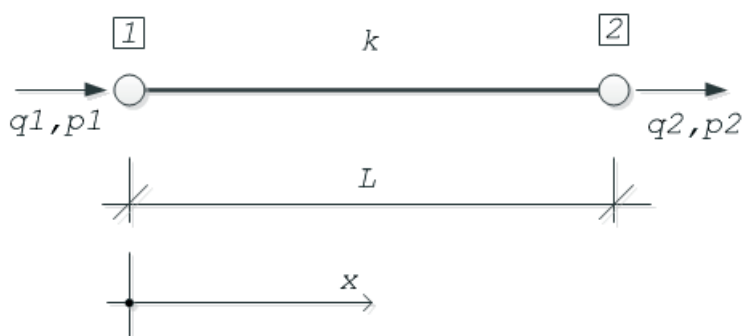
## 4.2 Datorberäkning

### 4.2.1 Finita elementmetoden

Finita elementmetoden (FEM) tillämpad på ett kanalsystem innebär diskretisering av kanaler och komponenter till ”finita element”, det vill säga uppdelning av geometrin i styckevis kontinuerliga element (Ottosen & Petersson, 1992).

#### Exempel 4.3

Betrakta nedanstående element med längden  $L$ .



Figur 12 Diskret kanal/rörellement

I elementets ena ände, nod 1, har vi det totala trycket  $p_1$ , flödet  $q_1$  och i elementets andra ände, nod 2, har vi det totala trycket  $p_2$  och flödet  $q_2$ . Elementets strömningsmotstånd kan vi beteckna med  $k$ . Per definition räknas flödet in i elementet positivt och flödet ut ur elementet räknas negativt (Ottosen & Petersson, 1992). Om vi förutsätter att strömningen är laminär kan vi teckna följande ekvationer

$$\Delta p = kq \Leftrightarrow \frac{1}{k} \Delta p = q \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{1}{k}(p_1 - p_2) = q_1 \\ -\frac{1}{k}(p_1 - p_2) = q_2 \end{cases}$$



Vilket vi kan skriva på matrisform som

$$\frac{1}{k} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} \left\{ \Leftrightarrow \frac{1}{k} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ -q_1 \end{bmatrix} \right.$$

där  $q_2 = -q_1$

Enligt antagandet om laminär strömning kan vi använda ekvation (2.5), *Hagen–Poiseuille* vilket ger oss en linjär elementmatrisekvation på formen  $\mathbf{K}^e \cdot \mathbf{a}^e = \mathbf{f}^e$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta p_f = \frac{128\mu L}{\pi d^4} q \\ \text{där } k = \frac{128\mu L}{\pi d^4} \end{array} \right\} \Leftrightarrow \Delta p_f = kq \left\{ \Leftrightarrow \frac{\pi d^4}{128\mu L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ -q_1 \end{bmatrix} \right. \quad (4.1)$$

$$\left. \frac{1}{k} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ -q_1 \end{bmatrix} \right\} \Leftrightarrow \underbrace{\frac{\pi d^4}{128\mu L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{K}^e} \underbrace{\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{a}^e} = \underbrace{\begin{bmatrix} q_1 \\ -q_1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}^e}$$

Om vi istället antar att flödet är turbulent, vilket ju oftast är fallet för kanalströmning, så gäller ekvation (2.4) *Darcy–Weisbach*, vilket ger oss en icke-linjär elementmatrisekvation på formen  $\mathbf{K}^e(q) \cdot \mathbf{a}^e = \mathbf{f}^e$

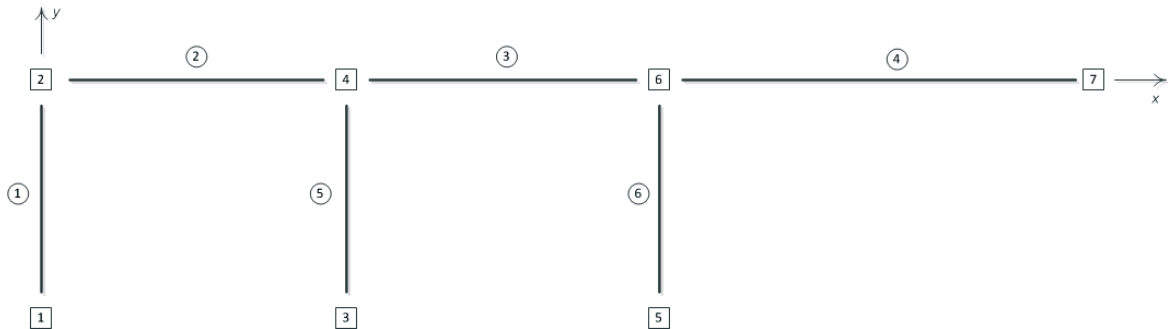
$$\left. \begin{array}{l} \Delta p_f = \frac{8\lambda L \rho}{\pi^2 d^5} q^2 \\ \text{där } k(q) = \frac{8\lambda L \rho}{\pi^2 d^5} q \end{array} \right\} \Leftrightarrow \Delta p_f = k(q)q \left\{ \Leftrightarrow \frac{\pi^2 d^5}{8\lambda L \rho q} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ -q_1 \end{bmatrix} \right. \quad (4.2)$$

$$\left. \frac{1}{k(q)} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ -q_1 \end{bmatrix} \right\} \Leftrightarrow \underbrace{\frac{\pi^2 d^5}{8\lambda L \rho q} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{K}^e(q)} \underbrace{\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{a}^e} = \underbrace{\begin{bmatrix} q_1 \\ -q_1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}^e}$$

Ekvation (4.2) saknar algebraisk lösning. Det är inte möjligt att invertera styvhetsmatrisen och därmed direkt erhålla en lösning. För att erhålla lösning krävs iterativa numeriska metoder, till exempel Newtons Metod eller andra stegvisa metoder (Cai & Sen, 2010).

### Exempel 4.4

Om vi för en stund bortser från ickelinjäritet kan vi nu med hjälp av nedanstående beräkningsmodell definiera ett ekvationssystem för hela systemet, med samma förutsättningar som Exempel 4.1. Beräkningsmodellen för detta fall består av 6 element och 7 noder vilket, kommer att ge oss ett ekvationssystem med en  $7 \times 7$ -styvhetsmatris.



Figur 13 Beräkningsmodell, 3-grenat F-system

Genom att betrakta Figur 9: Beräkningsmodell, 3-grenat F-system kan vi definiera följande tabell/matris för systemets frihetsgrader

Element	Startnod	Slutnod
1	1	2
2	2	4
3	4	6
4	6	7
5	3	4
6	5	6

Tabell 5 Frihetsgrader

Med hjälp av Tabell 5: Frihetsgrader kan vi assemblera elementstyvhetsmatriserna och lastvektorerna till ett komplett ekvationssystem som beskriver hela systemet. För att förenkla assembleringen kan vi först expandera element ekvationerna.

### Element 1

$$\frac{1}{k_1} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{K_1^{ee}} \underbrace{\begin{bmatrix} p_{11} \\ p_{12} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{a}_1^{ee}} = \underbrace{\begin{bmatrix} q_{11} \\ -q_{11} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}_1^{ee}}$$

### Element 2

$$\frac{1}{k_2} \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{K_2^{ee}} \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ p_{21} \\ 0 \\ p_{22} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{a}_2^{ee}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ q_{21} \\ 0 \\ -q_{21} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}_2^{ee}}$$

### Element 3

$$\frac{1}{k_3} \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{K_3^{ee}} \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ p_{31} \\ 0 \\ p_{32} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{a}_3^{ee}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ q_{31} \\ 0 \\ -q_{31} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}_3^{ee}}$$

**Element 4**

$$\frac{1}{k_4} \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & p_{41} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & p_{42} \end{bmatrix}}_{\mathbf{K}_4^{ee}} \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ p_{41} \\ p_{42} \end{bmatrix}}_{\mathbf{a}_4^{ee}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ q_{41} \\ -q_{41} \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}_4^{ee}}$$

**Element 5**

$$\frac{1}{k_5} \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & p_{51} \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & p_{52} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{K}_5^{ee}} \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ p_{51} \\ p_{52} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{a}_5^{ee}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ q_{51} \\ -q_{51} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}_5^{ee}}$$

**Element 6**

$$\frac{1}{k_6} \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & p_{61} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & p_{62} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{K}_6^{ee}} \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ p_{61} \\ p_{62} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{a}_6^{ee}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ q_{61} \\ -q_{61} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}_6^{ee}}$$

## Assemblering

För att erhålla den globala styvhetsmatrisen  $\mathbf{K}$  och den globala lastvektorn  $\mathbf{f}$  summeras de expanderade elementstyvhetsmatriserna enligt

$$\mathbf{K} = \sum_{i=1}^n \mathbf{K}_i^{ee}; \mathbf{a} = \sum_{i=1}^n \mathbf{a}_i^{ee}; \mathbf{f} = \sum_{i=1}^n \mathbf{f}_i^{ee}$$

Med  $n=6$ , det vill säga antalet element erhålls, enligt Exempel 4.3, det globala sammansatta ekvationssystemet

$$\underbrace{\begin{bmatrix} k_1^{-1} & -k_1^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_1^{-1} & k_1^{-1} + k_2^{-1} & -k_2^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2^{-1} & k_2^{-1} + k_5^{-1} & -k_5^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_5^{-1} & k_3^{-1} + k_5^{-1} & 0 & -k_3^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_6^{-1} & -k_6^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_3^{-1} & -k_6^{-1} & k_3^{-1} + k_4^{-1} + k_6^{-1} & -k_4^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_4^{-1} & k_4^{-1} & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{K}} \underbrace{\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \end{bmatrix}}_{\mathbf{a}} = \underbrace{\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \\ q_7 \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}}$$

Där de globala vektorerna  $\mathbf{a}$  och  $\mathbf{f}$  motsvaras av de expanderade element vektorerna  $\mathbf{a}^{ee}$  och  $\mathbf{f}^{ee}$

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} p_{11} \\ p_{12} + p_{21} \\ p_{22} + p_{51} \\ p_{31} + p_{52} \\ p_{61} \\ p_{32} + p_{41} + p_{62} \\ p_{42} \end{bmatrix}}_{\sum_{i=1}^{n=6} \mathbf{a}_i^{ee}}, \mathbf{f} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \\ q_7 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} q_{11} \\ -q_{11} + q_{21} \\ -q_{21} + q_{51} \\ q_{31} - q_{51} \\ q_{61} \\ -q_{31} + q_{41} - q_{61} \\ -q_{41} \end{bmatrix}}_{\sum_{i=1}^{n=6} \mathbf{f}_i^{ee}}$$

## Lösning

Om vi vill lösa ekvationssystemet ovan med hänsyn tagen till turbulens behöver vi alltså använda oss av elementekvation (4.2), vilket som sagt saknar algebraisk lösning. Med hjälp av Matlab och tillägget CALFEM (Austrell, o.a., 2004) kan vi formulera och lösa problemet. Att i FE-beräkning ta hänsyn till tryckfallet i böjar och T-stycken kräver att man definierar beräkningsuttryck för detta.

Som nämnts tidigare är detta ingen trivial uppgift. Här används därför samma värden som använts för diagrammetoden. Det bör här nämnas att det finns flertalet utredningar gjorda på området varav (Haghigi, Mohtar, Bralts, & Segerlind, 1991) föreslår beräkningsuttryck (matrisekvationer) för böjar, T-stycken, pumpar, ventiler, areaökning/minskning och diffusorer, som väl passar FE-beräkning.

Med noggrannheten  $eps = 0.00001$  och konvergenskriteriet  $\|q_n - q_{n-1}\| \leq eps$  ger programmet (se Bilaga för programkod) efter två iterationer utskriften:

```
Es =  
    0.1000  
    0.1000  
    0.2000  
    0.3000  
    0.1000  
    0.1000  
  
...  
dp17 =  
    110.3197  
  
dp37 =  
    96.1672  
  
dp57 =  
    80.6990
```

Där  $E_s$  är elementflödesvektorn flödet i  $[m^3]$  och  $dp17$  är tryckfallet i  $[Pa]$  räknat från nod 1 till nod 7,  $dp37$  är tryckfallet i  $[Pa]$  räknat från nod 3 till nod 7, och  $dp57$  är tryckfallet i  $[Pa]$  räknat från nod 5 till nod 7.

## 4.2.2 Integrerad datorberäknings- och projekteringsmetod

Utbudet av projekteringsverktyg för VVS-projektering som uppfyller svensk lagstiftning och praxis är idag ytterst begränsat. Det finns endast ett fåtal aktörer på marknaden varav MagiCAD är i särklass det vanligast förekommande.

MagiCAD är en av applikation (plugin) till Autodesk Revit och Autodesk AutoCAD med dess vertikaler. MagiCAD hanterar i stort sett alla VVS-discipliner (rör, ventilation, sprinkler och el) som en projekterande VVS-ingenjör kan tänkas behöva (CADCOM, 2011).

På ventilationssidan innehåller programmet, utöver ritverktygen, även beräkningsverktyg för tryckfallsberäkning, flödesberäkning, dimensionering och ljudberäkning. Det finns möjlighet att dimensionera enligt kända kriterier, det vill säga konstant tryckfall, konstant hastighet samt möjlighet att definiera egna dimensioneringskriterier.

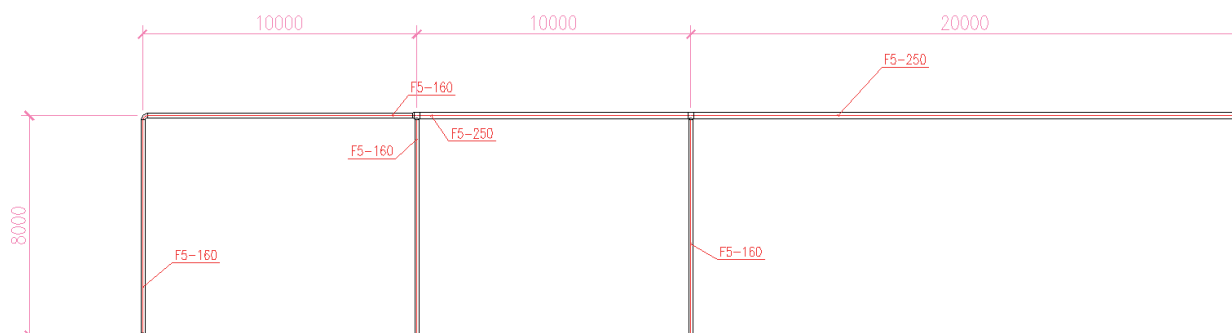
Programmet känns logiskt uppbyggt med en hierarkisk struktur med Projekt som högsta nivå och därunder följer de olika systemen (frånluft, tilluft, uteluft och egendefinierade system). Under system finner vi komponenter som kanaler, don, spjäll, fläktar etc. En av programmets kanske mest unika fördelar är just att komponenterna som kan väljas ur MagiCAD:s databas levereras av svenska tillverkare som till exempel Swegon, Fläkt, EKO med flera.

Dessa komponenter eller produkter utgörs av 3D-modeller av tillverkarnas fysiska produkter med samma karakteristik som de som återfinns i tillverkarnas produktkataloger (i alla fall är tanken denna). Denna fördel förstärks ytterligare av att den grafiska representationen av produkterna efterliknar dess verkliga förebild i både AutoCAD och Revit.

Dessutom följer den grafiska representationen av produkterna nära nog gängse ritningstekniska regler, så att det är möjligt att generera ritningar ur modellen enligt ”svensk standard”. I programmet, som är mycket lätt att lära sig, kan man arbeta både i 2D och 3D.

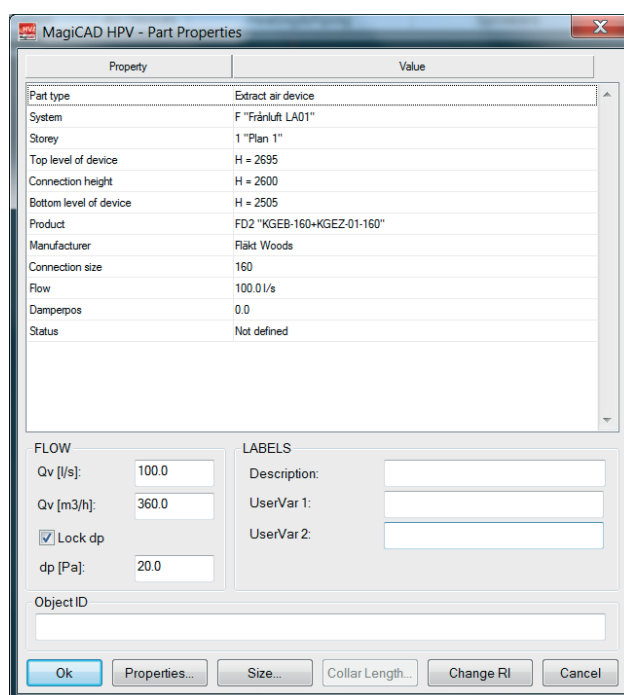
## Exempel 4.5

Med samma förutsättningar som ovan kan vi rita upp<sup>10</sup>, litterera och beräkna det 3-grenade frånluftssystemet i MagiCAD.



Figur 14 MagiCAD modell av 3-grenat F-system

Vi väljer don, här ett KGEB-160 don från Fläkt Woods, och definierar don-tryckfallet 20 Pa och flödet 100 l/s enligt förutsättningar. Vi kan här också ”låsa” don-tryckfallet till det angivna värdet så att inte MagiCAD ändrar detta om vi väljer att balansera systemet.

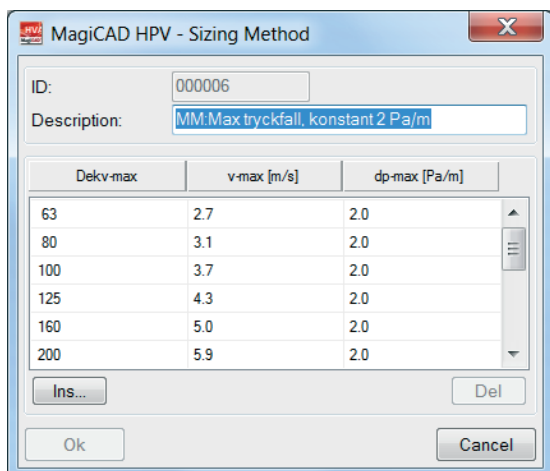


Figur 15 MagiCAD *Part Properties* dialog

<sup>10</sup> Uppritning sker när projektet definierats så att det passar förutsättningarna. Utöver de i uppgiften definierade förutsättningar behöver vi bland annat definiera system och tillhörande komponenter, samt andra vanligt förekommande AutoCAD/MagiCAD-inställningar.



Om det vore ett verkligt fall hade vi här kunnat ange ett rumsnummer eller liknande i fältet *Description*, avmarkerat *Lock dp* och låtit MagiCAD balansera systemet och därmed erhållit ett förinställningsvärde för det aktuella donet, *Damperpos*.

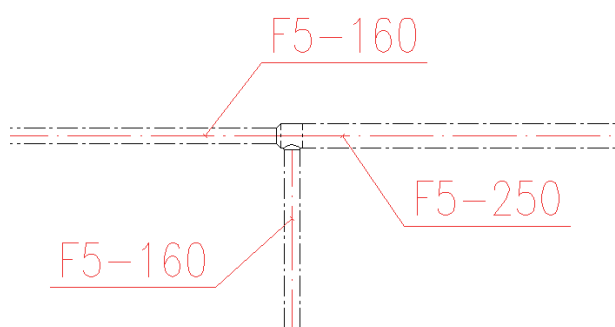


Med egendefinerat dimensioneringskriterium 2 Pa/m kan vi låta MagiCAD dimensionera vårt system. MagiCAD kommer att beräkna dimension (dimension som ger ett maximalt tryckfall om 2 Pa/m).

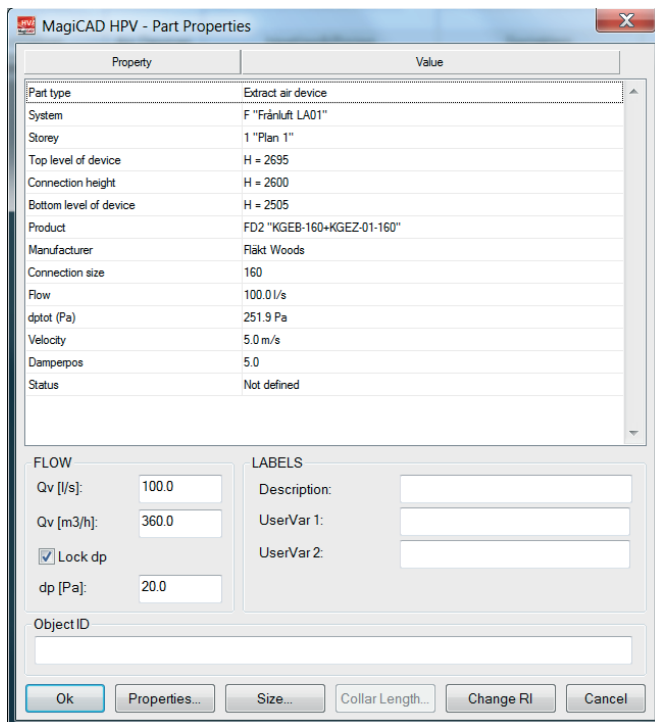
Figur 16 MagiCAD *Sizing Method*-dialog

Vi kan även låta MagiCAD beräkna tryckfall, hastighet och flöde. MagiCAD kommer efter slutförd beräkning även att uppdatera grafik och littera så att vi kan se den dimensionerande diametern på våra kanaler.

MagiCAD beräknar att dimensionen ska vara 200 mm för kanal A, D och E samt 250 mm för kanal B och C (jämför handberäkning kanal A, D och E 160 mm). Vi ändrar därför dimensionerna så att de stämmer överens med handberäkningen, vilket gör att det blir lättare att jämföra resultaten.



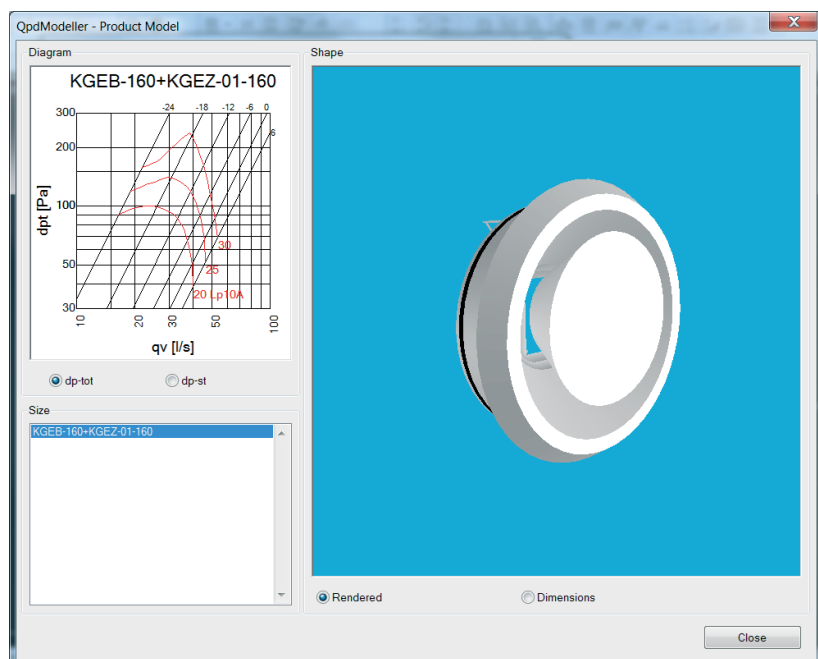
Figur 17 T-stycke 1, 3-grenat F-system



Genom att välja *Part Properties* för don A kan vi se att MagiCAD uppdaterat egenskaperna för donet med tryckfall, hastighet och doninställning.

Figur 18 MagiCAD *Part Properties*-dialog efter balansering

Vi kan även få ytterligare information, via *Properties* i *Part Properties*. Här kan vi bland annat studera arbetskurvan för donet<sup>11</sup>.



Figur 19 MagiCAD *Product Model*-dialog

<sup>11</sup> Här ser vi att detta don med givna förutsättningar inte klarar vedertagen praxis ( $30 \text{ dB} < L_pA$ ) (Enberg, 2009), vilket vi i detta exempel kan bortse ifrån. I en verklig dimensioneringssituation hade vi enkelt kunna avhjälpa detta genom att välja ett större don.

Precis som vid handberäkning har MagiCAD funktioner för att beräkna det totala tryckfallet för olika grenar, i alla fall funktioner som underlättar detta arbete. Via funktionen *Flow Route Examination* kan vi få fram en dialog med möjlighet att exportera data till exempelvis *Excel* för vidare analys.

Storey	Type	Description	Series or product	Size	qv [l/s]	v [m/s]	dptot [Pa]	djcon [Pa]	stat [Pa]	pat [Pa]	Notes
Plan 1	Extract air device		KGEB-160+KGEZ-01-160	160	100	5.0	240.0		0		
Plan 1	Duct		SPIRO ALZ	160	100	5.0	17.1		-240	-255	(R)
Plan 1	Bend-90		SPIRO ALZ	160	100	5.0	5.7		-257		
Plan 1	Duct		SPIRO ALZ	160	100	5.0	21.3	2.5	-263	-278	(R)
Plan 1	T-branch-90		SPIRO ALZ	250/160	200						
Plan 1	Duct		SPIRO ALZ	250	200	4.1	8.5	4.9	-287	-297	
Plan 1	T-branch-90		SPIRO ALZ	250/160	300						
Plan 1	Duct		SPIRO ALZ	250	300	6.1	36.9		-300	-322	
Plan 1	Open end/Unspec.		SPIRO ALZ	250	300				-337		

Figur 20 MagiCAD *Flow Route*-dialog för sträckan A-B-C.

För att erhålla det totala tryckfallet summerar vi helt enkelt värden i kolumn dptot. Och för detta exempel har vi att

$$\Delta p_{tot,A-B-C} = 240 + 17.1 + 5.7 + 21.3 + 8.5 + 36.9 = 240 + 89.5 = \underline{\underline{329.5 Pa}}$$

Detta är ju ett betydligt större tryckfall än vi erhöi vid handberäkningen. Förklaringen till detta framgår av det höga dontryckfallet. Det "orimligt" höga dontryckfallet är beroende av det valda donet KGEB, som inte "klarar av" att leverera vid det höga flödet 100 l/s. Genom att ersätta KGEB med ett annat don med ett dontryckfall på 20 Pa borde vi erhålla samma värde för totaltryckfallet som vid handberäkningen, det vill säga

$$\Delta p_{tot,A-B-C} = 329.5 - 240 + 20 = \underline{\underline{109.5 Pa}}$$

Storey	Type	Description	Series or product	Size	qv [l/s]	v [m/s]	dptot [Pa]	dpcon [Pa]	ptot [Pa]	pst [Pa]	Notes
Plan 1	Extract air device		KGEB-160+KGEZ-01-160	160	100	5.0	255.1		0		
Plan 1	Duct		SPIRO ALZ	160	100	5.0	17.2	14.3	255	-270	(R)
Plan 1	T branch-90		SPIRO ALZ	250/160	200						
Plan 1	Duct		SPIRO ALZ	250	200	4.1	8.5	4.9		-287	
Plan 1	T branch-90		SPIRO ALZ	250/160	300						
Plan 1	Duct		SPIRO ALZ	250	300	6.1	36.9			-300	-322
Plan 1	Open end/Unspec.		SPIRO ALZ	250	300					-337	

Figur 21 MagiCAD *Flow Route*-dialog för sträckan D-B-C.

För att erhålla det totala tryckfallet summerar vi helt enkelt värden i kolumn dptot. Och för detta exempel har vi att

$$\Delta p_{tot,D-B-C} = 255.10 + 17.2 + 8.8 + 36.90 = \underline{\underline{317.7 Pa}}$$

Enligt samma resonemang som ovan kan vi teckna det ”riktiga”, korrigerade totaltryckfallet som:

$$\Delta p_{tot,D-B-C} = 317.7 - 255.10 + 20 = \underline{\underline{82.6 Pa}}$$

Storey	Type	Description	Series or product	Size	qv [l/s]	v [m/s]	dptot [Pa]	dpcon [Pa]	ptot [Pa]	pst [Pa]	Notes
Plan 1	Extract air device		KGEB-160+KGEZ-01-160	160	100	5.0	269.2		0		
Plan 1	Duct		SPIRO ALZ	160	100	5.0	17.2	13.7	-269	-284	(R)
Plan 1	T branch-90		SPIRO ALZ	250/160	300						
Plan 1	Duct		SPIRO ALZ	250	300	6.1	36.9			-300	-322
Plan 1	Open end/Unspec.		SPIRO ALZ	250	300					-337	

Figur 22 MagiCAD *Flow Route*-dialog för sträckan E-C.

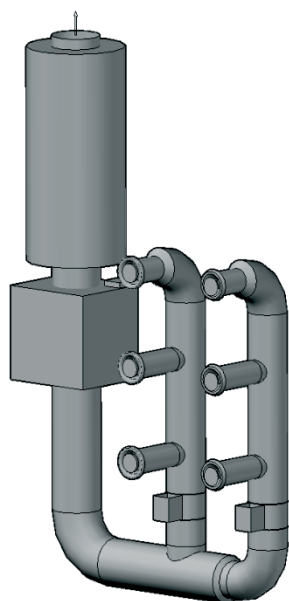
Och enligt ovan får vi på samma sätt totaltryckfallet för sträcka E-C

$$\Delta p_{tot,E-C} = 269.2 + 17.2 + 36.90 = \underline{\underline{323.3 Pa}}$$

Och det korrigerade tryckfallet blir då

$$\Delta p_{tot,E-C} = 323.3 - 269.2 + 20 = \underline{\underline{74.1 Pa}}$$

I MagiCAD kan vi göra injustering enligt *Förinställningsmetoden* och därmed erhålla förinställningsvärden på spjäll och don. Detta görs genom att trycka på knappen *Flow Summation and Balancing*. MagiCAD beräknar då flöde, tryckfall och ett förinställningsvärde, *Damperpos* för donen i det valda systemet.



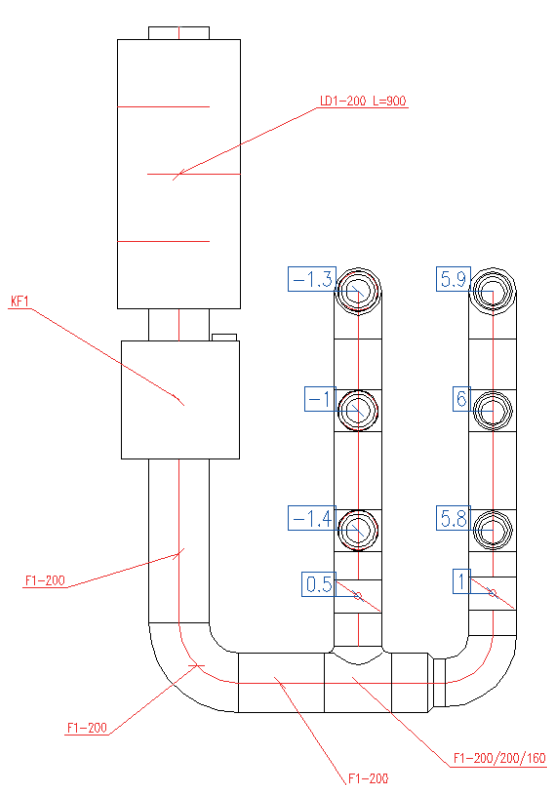
I kursen *VBFN10 - Projektering avseende energi, luft och fukt i nya byggnader*, som ges i samverkan mellan institutionen för Byggnadsfysik och avdelningen för Installationsteknik på LTH, ingår en laboration där ett tilluft- och ett frånluftssystem analyseras och injusteras med hjälp av *Proportionalitetsmetoden*.

Här redovisas en MagiCAD-modell av labuppställningen för frånluftssystemet.

Med hjälp av MagiCAD funktionen BOM (*Bill of Materials*) kan vi extrahera data från modellen, vilket ger oss följande tabell:

Class	Size	Series	Product	N	L[m]
Duct	100	LINDAB Spiro	SR-100	6	1.3
Duct	160	LINDAB Spiro	SR-160	9	1.3
Duct	200	LINDAB Spiro	SR-200	5	1.1
Bend-90	160	LINDAB Spiro	BU-160-90	3	
Bend-90	200	LINDAB Spiro	BU-200-90	1	
T-branch-90	160/160/100	LINDAB Spiro		4	
T-branch-90	200/200/160	LINDAB Spiro		1	
Reduction	160/100	LINDAB Spiro		2	
Reduction	200/160-0	LINDAB Spiro		1	
Extract air device	100	FD2	KGEB-100+KGEZ-01-100	3	
Extract air device	100	KVCA	EFF-100	3	
Flow damper	160	CRP16	CRPc 1-160	2	
Silencer	200	LD1	SLGU 200 900 100	1	
Fan	200	KF1	KVK-200	1	

**Tabell 6** MagiCAD Bill of Materials



Om vi antar att samtliga don har ett flöde om 20 l/s och låter MagiCAD balansera systemet kan doninställningen (förinställningen) redovisas direkt i modellen med hjälp av funktionen *Part Property Line*.

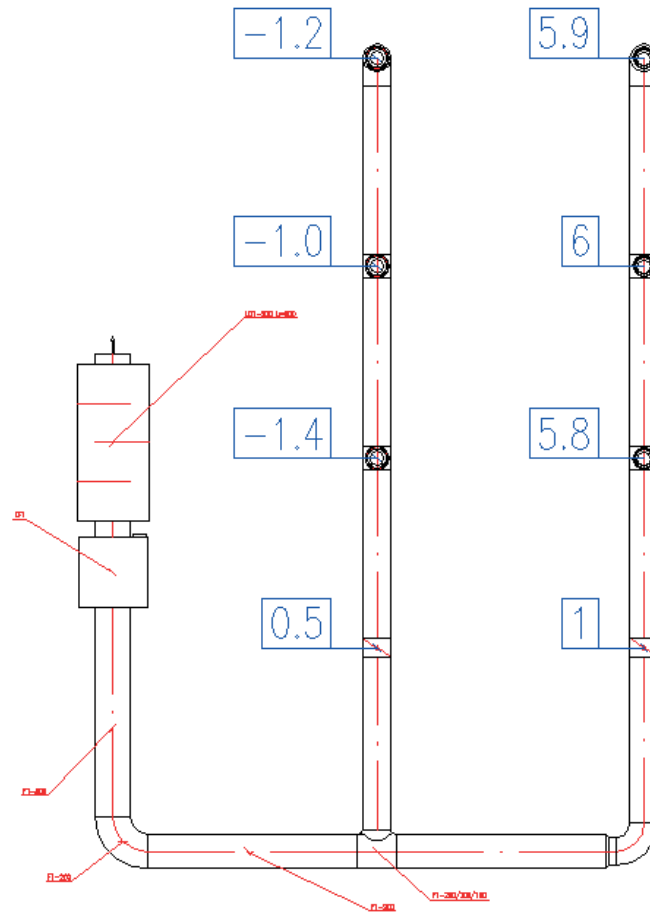
För den vänstra grenen med KVCA-donen har vi alltså att förinställningen är -1.3, -1, -1.4 respektive 0.5 mm för injusteringsspjället CRP16. För den högra grenen med FD2-donen (KGEB) har vi att förinställningen är 5.9, 6, 5.8 respektive 1 mm för injusteringsspjället CRP16.

Med dessa värden kan det sedan vara lättare att injustera den färdiga anläggningen, med dess olika system, vilka då vanligen injusteras med Proportionalitetsmetoden (Jensen, Injustering, 1999).

Enligt (Warfvinge & Dahlblom, 2010) är korta kanaler med få böjar och med tillräckligt avstånd att föredra vid projektering av ventilationssystem. Efter en böj eller annat strömningsmotstånd bildas virvlar som kräver en viss raksträcka för att utplånas. Som tumregel kan man utgå från att minsta avstånd mellan böj och avgrening eller mellan två avgreningar ska motsvara 6 kanaldiametrar <sup>12</sup> (Warfvinge & Dahlblom, 2010).

<sup>12</sup> Denna tumregel kan i verklig projektering, framförallt av komplexa byggnader, vara svår att uppnå då det ofta är ont om plats med andra system som ska samsas i samma utrymme.

I vårt labssystem ovan kan vi direkt konstatera att vi inte följer denna tumregel. Samtliga kanaler är för korta. Genom att ändra kanallängderna i modellen kan vi studera vad som händer. Om vi utgår från tumregeln "6D", erhålls följande uppdaterade modell.



Den beräknade skillnaden är marginell om ens numeriskt märkbar när kanalerna är så korta som de är, men den existerar. Vi kan med en digital modell laborera med i stort sett alla parametrar som påverkar tryckfall och flöde utan att detta "kostar" något extra.

## 4.3 Resultat

Resultatet av tryckfallsberäkningarna för det 3-grenade frånluftssystemet kan, efter att vi gjort ytterligare en *Flow Route Examination* i MagiCAD samt korrigerat totaltryckfallen enligt samma resonemang som ovan, sammanställas i en tabell:

Beräkningsmetod	dp,tot A-B-C [Pa]	dp,tot D-B-C [Pa]	dp,tot E-C [Pa]
Tabellmetod	126.4	109.1	83.5
Diagrammetod	108.6	93	78
FEM	110.3	96.2	80.7
MagiCAD	109.5	82.6	74.1

**Tabell 7** Sammanställning av beräkningsresultat för 3-grenat F-system

Skillnaden mellan resultaten från de olika metoderna är relativt liten, med undantag av tabellmetoden. Förklaringen är att den tabellmetod som använts här baseras på *amerikanska mätdata* och de övriga på *svenska mätdata*. Det är sannolikt så att om vi hade använt andra tabeller och diagram från någon annan tillverkare vi även då skulle fått andra resultat.

Beräkningsmetoderna skiljer sig i princip endast genom förfarandet och därmed lämplighet för hand- eller datorberäkning. Resultaten är snarlika och skillnaderna dem emellan, med avseende på resultatet, har snarare med indatas beskaffenhet än att göra med val av metod.

Generellt, och kanske viktigast av allt, är att komma ihåg att alla här presenterade beräkningsmetoder baseras på *idealiserade fall*, approximationer och i många gånger osäkra indata. Dessutom är det nog så att det behövs fler och bättre beräkningsuttryck som på ett mer verklighetstroget sätt kan beskriva tryckfallet för det turbulenta området efter en böj, spjäll eller ett T-stycke.

Vi kan alltså härmed dra slutsatsen att tryckfallsberäkning av kanalsystem är långt ifrån en exakt vetenskap och att det föreligger en potential att förbättra beräkningsuttrycken, framförallt i det *turbulenta området*. För att erhålla exakta resultat behöver vi exakta indata samt väl avgränsade och korrekta beräkningsmodeller.



## 5 Intervju

För att bilda mig en bättre uppfattning för hur VVS-branschen ser på projekteringsstöd, vilka tankar och idéer man har kring projekteringsmetodik, samt vilka krav som bör ställas på nyutexaminerade högskoleutbildade ingenjörer, har jag genomfört intervjuer med några VVS-projektörer. Intervjuerna genomfördes den 22 september 2011 både som e-postenkät och telefonintervju.

### 5.1 Intervjufrågor

1. Vilka projekteringsverktyg använder Ni, vid projektering av ventilation (fördelar/nackdelar och eventuella begränsningar)?
2. Hur förhåller sig Er organisationen till BIM (existerar utveckling inom organisationen, IFC etc.)?
3. Vad tycker Du att studenter från högskolan behöver ”lära sig/borde kunna” för att arbeta med projektering av VVS (”ventilation”)?

## 5.2 Intervjusvar

### E-postenkät besvarad av Civilingenjörerna Dimitris Markou och Fredrik Persson, Bengt Dahlgren AB

*”Vi använder oss mestadels av CADCOM:s MagiCAD för Autodesk:s AutoCAD när vi projekterar ventilation. I övrigt används fabrikanterers produktvalsprogram för till exempel aggregat, don, ljuddämpare mm. (Vissa enstaka projekt ritas med Lindabs CADVent men den är på utgående och vissa funktioner håller på att inarbetas i MagiCAD).*

*Fördelar: Materiallistor, kanaldimensionering, texthjälp, kollisionskontroll, tryckfallsberäkningar, ljudberäkningar, upprättande av sektioner, lagerhantering mm.*

*Nackdelar: Begränsningar i ljudberäkningar, småbuggar (dock uppdateras programmet kontinuerligt för att rätta till dessa), projektering av VAV-system på ett enkelt sätt.”*

*”MagiCAD för AutoCAD är BIM. Då det bara finns moduler för Rör, Vent och El måste informationen exporteras för att importeras till andra databaser. Det pågår ett arbete inom företaget att börja projektera med MagiCAD för Autodesk:s Revit. Då har man möjlighet att projektera A, K, V, VS, EL med samma programvara och då har man kommit en bra bit längre vad gäller BIM. Det har projekterats mindre projekt i Revit och nu pågår ett arbete för att ta fram projekteringsrutiner samt anpassa programmet med våra önskemål (till exempel redovisning, textning mm).”*

*”Grundläggande CAD-kunskaper är ett måste. En grundutbildning i MagiCAD hade underlättat då det är bland det första man får arbeta med.*

*En stor brist bland nya konstruktörer är att man saknar verklighetsförankring med det man konstruerar. Hur ser prylarna ut? Hur sker montaget?*

*En annan brist brukar vara att man saknar insyn i övriga konstruktörers arbetsområde (till exempel El, Styr, Rör, K).”*

## Telefonintervju med Ingenjör Bengt Göransson, Ramböll AB

*”Om vi själva får välja så blir det MagiCAD. Även om det finns begränsningar i programmet är det ändå att föredra framför andra program. Att det inte finns stöd för VAV-system innebär att vi i princip måste rita två likadana system med olika flöde, vilket ju innebär dubbelt arbete. I projekt där vi inte kan välja verktyg själva förekommer ofta att beställaren indirekt specificerat Autodesk AutoCAD MEP. Beställaren har här ställt krav på att leverans ska ske med OMF-objekt, vilket inte MagiCAD kan leverera men däremot AutoCAD MEP.”*

*”För oss är BIM vardag, det är inget vi hanterar specifikt utan något som ingår som en naturlig del av det dagliga arbetet.”*

*”Rent generellt anser jag att man inte behöver vara civilingenjör för att kunna projektera ventilation. Jag tycker också att de nya studenterna har alldeles för dåliga kunskaper i VVS, överhuvudtaget. Det finns visserligen studenter som har fått med sig en hel del från skolan och framför allt de som har gått KY-utbildning inom VVS. Förr, under början av 90-talet fanns det en väldigt bra VVS-utbildning på kvällstid i Malmö som gavs av VVS-branschen. Tyvärr lades denna ner 1992. För att arbeta som VVS-projektör behövs utöver kunskap ett intresse. Idag tvingas vi lära upp studenterna eftersom de saknar detta från skolan.”*

## Telefonintervju med Civilingenjör Martin Edfeldt, Sweco Systems AB

*”Vi använder oss framför allt av MagiCAD för AutoCAD. MagiCAD ger oss möjlighet att både dimensionera och beräkna riktiga komponenter och generera listor direkt ur programmet. Vi använder även MagiCAD Room, Riuska och själv använder jag också ProAir från Swegon vilket bland annat ger en god uppfattning om isoveler vid donval. Det finns förstås en hel del begränsningar i programmet till exempel inget inbyggt stöd för VAV-system, ringmatning eller bra funktioner för att spegla kanaler. Trots dessa stora begränsningar så är det ändå så att detta är det verktyg vi föredrar. En del av våra beställare har specifika krav på objekt- och filformat som MagiCAD inte kan leverera. Då använder vi andra projekteringsverktyg, till exempel Autodesk AutoCAD MEP, där en viktig begränsning är att vi då endast kan använda generiska objekt. Även om det är mindre vanligt så förekommer det även att vi använder POINT i vissa projekt. Det är helt upp till beställaren vilka verktyg som skall användas i projektet.”*

*”Vi ligger i framkant när det handlar om BIM. Vi tar ut mängdförteckningar och styckelistor direkt ur programmet och har erfarenhet av att kommunicera via IFC-formatet. Själv tror jag mycket på Autodesk Revit som projekteringsverktyg och då framförallt MagiCAD för Revit. Med denna plattform öppnar sig helt andra möjligheter att göra det vi ska.”*

*”För de studenter som avser att arbeta som ventilationsprojektörer efter avslutad utbildning anser jag att ett minimi krav borde vara att behärska den grundkurs, eller motsvarande, som CADCOM ger i MagiCAD.”*

## 6 Diskussion och slutsats

Indelningen av de olika beräkningsmetoderna i handberäkningsmetoder och datorberäkningsmetoder är egentligen endast ett sätt att ange vilken metod som är lämpad att beräkna för hand respektive med hjälp av dator. Alla här beskrivna metoder kan förstås beräknas för hand. Integreerade datorberäknings- och projektmetoder använder även de beräkningsuttryck som en gång är framtagna med hjälp av handberäkning.

När vi beräknar ett och samma ventilationssystem för hand kan vi konstatera att vi kommer att erhålla olika resultat beroende på vilka tabeller och diagram vi använder. Dessutom kommer antagligen olika personer att komma fram till olika resultat beroende på vald metod men också på grund av olika mätnoggrannhet. Detta är förstås varken önskvärt eller optimalt.

*Tabellmetod:* Den här beskrivna metoden förutsätter bland annat att dimensionen för kanalerna är känd vilket enkelt kan tas fram med hjälp av *Darcy-Weisbach* ekvation (2.4) antagande om kanaltryckfall per meter samt friktionsmotstånd.

Härefter kan de olika motståndstalen avläsas i tabell och tryckfall beräknas. Eftersom det många gånger handlar om att värden interpoleras ur tabellen kan vi också utgå från att det finns en viss osäkerhet i de beräknade värdena. Denna osäkerhet skall dock jämföras med den relativt större osäkerhet som inträffar då data extrapoleras ur ett diagram.

*Diagrammetod:* Den metod som beskrivs här är strukturerad och med rätt diagram och noggrann avläsning borde resultatet vara tillförlitligt.

Genom att skapa approximativa beräkningsuttryck baserade på vedertagna diagram kan dessa mätfel och mätarbete helt elimineras, varvid beräkningarna kommer att leverera samma resultat oberoende av vem som utför dem. Detta kan tyckas vara ett ickeproblem idag eftersom beräkningar antagligen ändå utförs i någon form av projekteringsverktyg. Detta är visserligen sant ända tills det är dags att redovisa beräkningarna.

Vid flödesberäkning av grenade system behöver man inte ta hänsyn till om flödet är laminärt eller turbulent. Detta innebär att man kan använda det enklare linjära sambandet enligt *Poiseuille* ekvation (2.5) vid dessa beräkningar.

Vid tryckfallsberäkningar av grenade system är man alltid hänvisad till det svårare ickelinjära sambandet enligt *Darcy Weisbach* ekvation (2.4) vilket innebär ett iterativt lösningsförfarande med noga valda startvärden för att uppnå konvergens.

MagiCAD är ett mycket kompetent och lättanvänt projekteringsverktyg. Men precis som alla datorprogram har det både för- och nackdelar. Jag har här inte för avsikt att presentera någon lista

över för- och nackdelar utan vill istället nämna det som jag finner mer intressant, nämligen de beräkningsuttryck som MagiCAD använder sig av.

Jag har av CADCOM:s ledning fått ta del av dessa mot att inte publicera dem i min rapport. När jag studerat dessa, utan att veta hur de implementerats, kan jag konstatera att de är approximationer precis som de beräkningsuttryck som jag tagit fram ovan. Styckevisa kontinuerliga funktioner som är giltiga i olika intervall. Beräkningsuttrycken är kanske mer väldefinierade i sina intervall än de som jag tagit fram, men de ska ju också hålla för riktig projektering.

Antagligen kan man trots detta konstruera system med hjälp av MagiCAD som inte kan leverera ett ”korrekt” resultat. Detta kan ha många olika orsaker varav ett tänkbart scenario är att en tillverkare av till exempel en ljuddämpare av någon anledning konstruerat denna felaktigt. Resultatet av beräkning av ett system som innehåller en felaktig produkt blir förstås fel.

Ringmatning är ett av de fall som MagiCAD inte kan hantera beräkningsmässigt. Om symmetri inte förekommer innebär detta att beräkningarna kan bli mycket svåra att hantera för hand. Med hjälp av FE-beräkningsmetoder är det möjligt att göra dessa beräkningar med hjälp av dator. Nackdelen är att beräkningsmodellen och den efterföljande programmeringen kan ta tid, men det kan uppvägas av att det är möjligt att leverera ett ”korrekt” resultat.

Det hade förstås varit önskvärt att direkt kunna åstadkomma dessa beräkningar i MagiCAD. Lösningen i MagiCAD blir för ringmatade system att rita upp minst två slingor som ”nästan” ansluter varandra, beräkna dessa och sammanräkna resultaten.

För projektering av verkliga luftbehandlingsystem behöver man av naturliga skäl även ta hänsyn till andra discipliner såsom A, K, VS, El och Sprinkler. Detta ställer stora krav på *samordning* och vid 3D-projektering kan man utnyttja programvaran för bland annat kollisionskontroll. Den hänsyn som här måste tas innebär i de allra flesta fall *geometriska förändringar* av luftbehandlingsystemen där man med ventilationskanalen kanske måste gå över en kabelstege, förbi en pelare och under ett rörstråk.

Dessutom är det sannolikt att man behöver passera brandcellsgränser och kanske då betjänar utrymmen som tillhör olika brandceller vilket innebär att det behövs brandgas- eller brand/brandgasspjäll. Denna problematik får då även *icke geometriska konsekvenser* för både tryckfall och flöde för berörda luftbehandlingsystem och därmed sannolikt ökade tryckfall mot det som var tänkt från början.

Tidigare projekterades all ventilation för hand. Man ritade för hand och man räknade för hand. Idag finns alltså helt andra möjligheter både för uppritning, beräkning och inte minst för samordning. När både beräknings- och samordningsfunktioner, såväl som kollisionskontroll finns integrerade i programmen kan man ju lockas till att dra slutsatsen att allt är som det ska vara. Och det är det antagligen också, med ett fåtal undantag. Ett sådant undantag som bekräftar nödvändigheten av att kunna tillämpa handberäkningsmetoder, eller någon form av extern beräknings-

programvara, är vid ombyggnads- eller tillbyggnadsprojekt. Underlaget kan då till exempel utgöras av en 2D-ritning och till en sådan är det svårt att ansluta våra nya ”3D-BIM-modell-kanaler” och trycka på ”beräknaknappen” för att få ut korrekta värden för systemet.

Men eftersom uppritning och beräkning är aktiviteter som är mycket starkt beroende av varandra kan vi framöver inte annat än förvänta oss fler och ännu bättre funktioner i befintliga programvaror. Kanske kan vi till och med även få se ”konkurrerande” programvaror som kommer att tillgodosä dessa behov?

För att avsluta rapporten vill jag sammanfatta min konklusion av enkätsvaren med följande kommentar: för den projekterande delen av installationsbranschen idag är, *MagiCAD* för *AutoCAD* de facto standard.





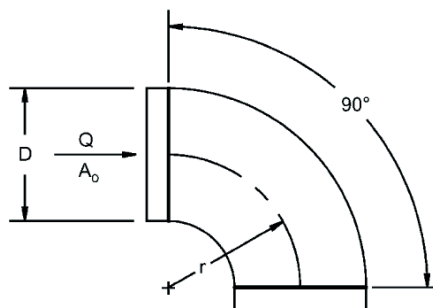
# **Bilaga**

# Utdrag ur ASHRAE Handbook

Tabeller och figurer från ASHRAE Handbook

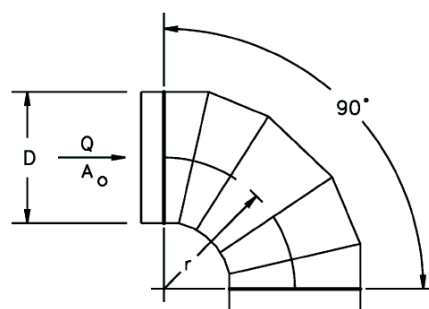
**CD3-1 Elbow, Die Stamped, 90 Degree,  $r/D = 1.5$**

$D$ , mm	75	100	125	150	180	200	230	250
$C_o$	0.30	0.21	0.16	0.14	0.12	0.11	0.11	0.11

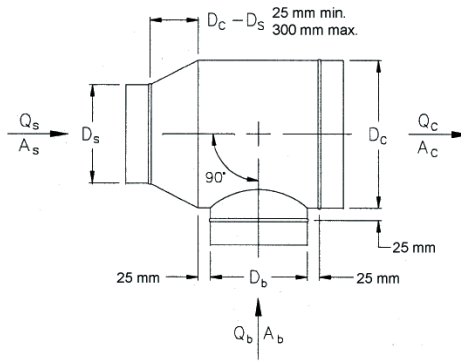


**CD3-9 Elbow, 5 Gore, 90 Degree,  $r/D = 1.5$**

$D$ , mm	75	150	230	300	380	450	530	600	690	750	1500
$C_o$	0.51	0.28	0.21	0.18	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12	0.12	0.12



ED5-3 Tee,  $D_c \leq 250$  mm, Converging



$C_b$  Values

$A_s/A_c$	$A_b/A_c$	$Q_b/Q_c$								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	0.1	-13.39	-1.73	0.13	0.68	0.89	0.98	1.02	1.05	1.08
	0.2	-56.68	-9.99	-2.53	-0.32	0.52	0.88	1.04	1.12	1.18
	0.3	-128.89	-23.79	-6.99	-2.02	-0.12	0.68	1.04	1.20	1.29
	0.4	-230.03	-43.12	-13.26	-4.40	-1.04	0.40	1.03	1.30	1.42
	0.5	-360.10	-68.01	-21.33	-7.49	-2.23	0.02	1.00	1.40	1.53
	0.6	-519.10	-98.44	-31.20	-11.27	-3.69	-0.46	0.95	1.52	1.66
	0.7	-706.92	-134.35	-42.83	-15.70	-5.38	-0.99	0.93	1.70	1.88
	0.8	-923.64	-175.79	-56.25	-20.82	-7.34	-1.60	0.90	1.91	2.15
	0.9	-1169.	-222.75	-71.47	-26.62	-9.56	-2.30	0.87	2.14	2.44
	1.0	-1444.	-275.24	-88.47	-33.10	-12.04	-3.08	0.84	2.40	2.76
0.2	0.1	-5.33	-0.12	0.69	0.92	1.01	1.04	1.06	1.08	1.13
	0.2	-24.56	-3.63	-0.36	0.59	0.93	1.08	1.14	1.19	1.27
	0.3	-56.72	-9.54	-2.15	-0.01	0.78	1.10	1.23	1.30	1.39
	0.4	-101.83	-17.86	-4.68	-0.87	0.52	1.09	1.32	1.41	1.48
	0.5	-159.91	-28.59	-7.98	-2.02	0.17	1.05	1.40	1.51	1.51
	0.6	-230.83	-41.68	-11.98	-3.39	-0.24	1.03	1.53	1.66	1.61
	0.7	-314.56	-57.10	-16.68	-4.98	-0.69	1.04	1.71	1.90	1.82
	0.8	-411.18	-74.90	-22.10	-6.82	-1.21	1.04	1.92	2.16	2.05
	0.9	-520.69	-95.08	-28.25	-8.90	-1.81	1.04	2.15	2.45	2.31
	1.0	-643.09	-117.63	-35.12	-11.24	-2.47	1.04	2.41	2.78	2.58

ED5-3 Tee,  $D_c < \text{or} = 250 \text{ mm}$ , Converging (Continued)

		$C_b$ Values (Continued)								
		$Q_b/Q_c$								
$A_g/A_c$	$A_b/A_c$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.3	0.1	-2.67	0.42	0.88	1.01	1.05	1.07	1.09	1.11	1.18
	0.2	-14.05	-1.55	0.36	0.89	1.08	1.16	1.19	1.23	1.34
	0.3	-33.18	-4.91	-0.58	0.64	1.07	1.23	1.30	1.34	1.44
	0.4	-60.09	-9.68	-1.94	0.24	1.00	1.29	1.39	1.42	1.47
	0.5	-94.80	-15.89	-3.74	-0.33	0.87	1.32	1.46	1.46	1.38
	0.6	-136.97	-23.33	-5.84	-0.92	0.81	1.45	1.65	1.66	1.53
	0.7	-186.81	-32.14	-8.32	-1.62	0.74	1.61	1.88	1.88	1.70
	0.8	-244.33	-42.30	-11.19	-2.43	0.65	1.78	2.14	2.13	1.88
	0.9	-309.54	-53.82	-14.44	-3.35	0.54	1.98	2.42	2.41	2.08
	1.0	-382.43	-66.70	-18.08	-4.39	0.42	2.19	2.74	2.72	2.29
0.4	0.1	-1.36	0.69	0.98	1.06	1.08	1.10	1.11	1.14	1.23
	0.2	-8.95	-0.54	0.71	1.04	1.15	1.20	1.22	1.26	1.40
	0.3	-21.82	-2.70	0.16	0.94	1.19	1.29	1.32	1.35	1.47
	0.4	-39.99	-5.81	-0.67	0.73	1.19	1.35	1.39	1.39	1.41
	0.5	-63.37	-9.82	-1.75	0.45	1.18	1.42	1.47	1.43	1.32
	0.6	-91.72	-14.59	-2.97	0.20	1.26	1.60	1.67	1.60	1.43
	0.7	-125.23	-20.24	-4.41	-0.10	1.34	1.81	1.90	1.81	1.56
	0.8	-163.91	-26.77	-6.09	-0.45	1.43	2.04	2.16	2.03	1.69
	0.9	-207.76	-34.17	-7.99	-0.85	1.53	2.30	2.44	2.28	1.82
	1.0	-256.79	-42.45	-10.12	-1.30	1.63	2.58	2.75	2.54	1.95
0.5	0.1	-0.60	0.85	1.04	1.09	1.11	1.12	1.13	1.16	1.27
	0.2	-6.03	0.04	0.91	1.13	1.20	1.22	1.24	1.29	1.44
	0.3	-15.35	-1.46	0.56	1.09	1.25	1.30	1.32	1.35	1.46
	0.4	-28.59	-3.67	-0.01	0.96	1.26	1.34	1.35	1.32	1.29
	0.5	-45.45	-6.42	-0.66	0.85	1.33	1.45	1.45	1.38	1.24
	0.6	-65.92	-9.70	-1.41	0.78	1.46	1.64	1.63	1.53	1.32
	0.7	-90.12	-13.58	-2.29	0.69	1.61	1.86	1.85	1.70	1.39
	0.8	-118.07	-18.07	-3.32	0.57	1.78	2.11	2.09	1.89	1.46
	0.9	-149.75	-23.18	-4.49	0.43	1.96	2.38	2.35	2.09	1.53
	1.0	-185.19	-28.89	-5.81	0.27	2.16	2.67	2.63	2.31	1.57
0.6	0.1	-0.11	0.96	1.09	1.12	1.12	1.13	1.15	1.18	1.31
	0.2	-4.20	0.39	1.03	1.18	1.22	1.24	1.26	1.30	1.47
	0.3	-11.33	-0.72	0.79	1.16	1.27	1.30	1.31	1.33	1.43
	0.4	-21.57	-2.42	0.35	1.05	1.25	1.29	1.27	1.22	1.12
	0.5	-34.29	-4.35	-0.03	1.07	1.38	1.44	1.41	1.32	1.16
	0.6	-49.85	-6.73	-0.50	1.08	1.54	1.63	1.57	1.45	1.19
	0.7	-68.26	-9.55	-1.06	1.09	1.71	1.83	1.76	1.58	1.21
	0.8	-89.52	-12.81	-1.72	1.10	1.91	2.07	1.97	1.73	1.22
	0.9	-113.64	-16.52	-2.47	1.10	2.12	2.32	2.20	1.88	1.21
	1.0	-140.62	-20.68	-3.33	1.09	2.35	2.60	2.44	2.03	1.16
0.7	0.1	0.22	1.03	1.12	1.14	1.14	1.14	1.16	1.20	1.35
	0.2	-3.00	0.62	1.10	1.21	1.23	1.24	1.26	1.31	1.49
	0.3	-8.74	-0.27	0.91	1.19	1.26	1.27	1.27	1.28	1.36
	0.4	-16.90	-1.59	0.58	1.11	1.25	1.27	1.24	1.18	1.06
	0.5	-26.99	-3.06	0.33	1.17	1.38	1.41	1.36	1.26	1.06
	0.6	-39.35	-4.86	0.02	1.22	1.54	1.57	1.50	1.35	1.05
	0.7	-53.97	-7.01	-0.35	1.29	1.72	1.76	1.65	1.45	1.02
	0.8	-70.87	-9.50	-0.79	1.35	1.91	1.97	1.82	1.54	0.96
	0.9	-90.04	-12.34	-1.31	1.41	2.12	2.19	2.00	1.64	0.86
	1.0	-111.50	-15.53	-1.89	1.46	2.34	2.43	2.19	1.73	0.72
0.8	0.1	0.46	1.08	1.14	1.15	1.15	1.16	1.17	1.22	1.38
	0.2	-2.20	0.76	1.14	1.22	1.24	1.24	1.26	1.31	1.49
	0.3	-7.04	-0.01	0.95	1.18	1.23	1.23	1.23	1.22	1.27
	0.4	-13.77	-1.06	0.71	1.13	1.24	1.24	1.20	1.13	1.00
	0.5	-22.11	-2.24	0.54	1.20	1.36	1.36	1.30	1.19	0.97
	0.6	-32.33	-3.69	0.31	1.27	1.50	1.50	1.41	1.25	0.90
	0.7	-44.42	-5.41	0.04	1.34	1.66	1.65	1.53	1.30	0.81
	0.8	-58.40	-7.42	-0.29	1.42	1.83	1.83	1.65	1.35	0.67
	0.9	-74.28	-9.72	-0.67	1.49	2.01	2.01	1.78	1.38	0.49
	1.0	-92.06	-12.30	-1.12	1.56	2.21	2.20	1.92	1.40	0.24

ED5-3 Tee,  $D_c < \text{or} = 250 \text{ mm}$ , Converging (Continued)

		$C_b$ Values (Concluded)								
$A_g/A_c$	$A_b/A_c$	$Q_b/Q_c$								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.9	0.1	0.62	1.12	1.16	1.16	1.16	1.17	1.19	1.24	1.41
	0.2	-1.67	0.85	1.16	1.22	1.23	1.24	1.25	1.30	1.48
	0.3	-5.95	0.12	0.95	1.14	1.18	1.18	1.16	1.15	1.14
	0.4	-11.68	-0.74	0.77	1.12	1.20	1.20	1.16	1.08	0.93
	0.5	-18.85	-1.74	0.63	1.18	1.31	1.30	1.23	1.11	0.86
	0.6	-27.63	-2.98	0.44	1.24	1.42	1.41	1.31	1.13	0.75
	0.7	-38.04	-4.45	0.21	1.30	1.55	1.53	1.39	1.14	0.58
	0.8	-50.07	-6.17	-0.07	1.36	1.69	1.66	1.47	1.13	0.37
	0.9	-63.75	-8.14	-0.40	1.42	1.83	1.79	1.54	1.11	0.09
	1.0	-79.08	-10.36	-0.79	1.46	1.98	1.92	1.61	1.06	-0.26
1.0	0.1	0.74	1.15	1.18	1.17	1.17	1.18	1.20	1.25	1.43
	0.2	-1.33	0.89	1.16	1.21	1.22	1.22	1.24	1.29	1.46
	0.3	-5.30	0.15	0.90	1.08	1.11	1.11	1.09	1.06	0.99
	0.4	-10.31	-0.57	0.78	1.09	1.16	1.15	1.11	1.03	0.86
	0.5	-16.71	-1.47	0.64	1.13	1.24	1.22	1.15	1.03	0.74
	0.6	-24.56	-2.59	0.46	1.17	1.32	1.30	1.20	1.01	0.57
	0.7	-33.87	-3.93	0.23	1.20	1.41	1.38	1.24	0.97	0.34
	0.8	-44.64	-5.49	-0.05	1.22	1.51	1.46	1.27	0.91	0.05
	0.9	-56.89	-7.29	-0.38	1.24	1.59	1.54	1.28	0.82	-0.33
	1.0	-70.62	-9.32	-0.77	1.24	1.68	1.61	1.28	0.69	-0.80
		$C_s$ Values								
$A_g/A_c$	$A_b/A_c$	$Q_s/Q_c$								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	0.1	6.57	1.67	1.10	0.95	0.88	0.85	0.84	0.83	0.82
	0.2	4.13	1.39	1.03	0.92	0.87	0.85	0.83	0.83	0.82
	0.3	3.30	1.30	1.00	0.91	0.87	0.85	0.83	0.82	0.82
	0.4	2.89	1.24	0.99	0.90	0.86	0.84	0.83	0.82	0.82
	0.5	2.63	1.21	0.97	0.90	0.86	0.84	0.83	0.82	0.82
	0.6	2.45	1.18	0.97	0.89	0.86	0.84	0.83	0.82	0.82
	0.7	2.32	1.16	0.96	0.89	0.86	0.84	0.83	0.82	0.82
	0.8	2.22	1.15	0.95	0.89	0.85	0.84	0.83	0.82	0.82
	0.9	2.14	1.13	0.95	0.88	0.85	0.84	0.83	0.82	0.82
	1.0	2.07	1.12	0.94	0.88	0.85	0.84	0.83	0.82	0.82
0.2	0.1	34.53	5.26	2.11	1.29	0.98	0.84	0.76	0.71	0.68
	0.2	18.11	3.42	1.62	1.11	0.90	0.80	0.74	0.70	0.68
	0.3	12.67	2.79	1.45	1.04	0.87	0.78	0.73	0.70	0.68
	0.4	9.98	2.47	1.36	1.01	0.85	0.77	0.72	0.69	0.67
	0.5	8.39	2.27	1.30	0.98	0.84	0.76	0.72	0.69	0.67
	0.6	7.34	2.13	1.26	0.96	0.83	0.76	0.72	0.69	0.67
	0.7	6.61	2.02	1.22	0.95	0.82	0.75	0.71	0.69	0.67
	0.8	6.08	1.94	1.19	0.93	0.81	0.75	0.71	0.68	0.67
	0.9	5.68	1.87	1.17	0.92	0.80	0.74	0.70	0.68	0.66
	1.0	4.55	1.61	1.05	0.86	0.76	0.71	0.68	0.66	0.65
0.3	0.1	90.35	12.35	4.15	2.07	1.30	0.95	0.76	0.65	0.59
	0.2	44.33	7.19	2.80	1.57	1.08	0.84	0.71	0.63	0.57
	0.3	29.24	5.46	2.33	1.40	1.00	0.80	0.69	0.62	0.57
	0.4	21.88	4.59	2.09	1.30	0.96	0.78	0.67	0.61	0.56
	0.5	17.62	4.06	1.93	1.24	0.92	0.76	0.66	0.60	0.56
	0.6	14.90	3.71	1.82	1.19	0.90	0.74	0.65	0.59	0.55
	0.7	13.06	3.45	1.74	1.15	0.88	0.73	0.64	0.59	0.55
	0.8	11.78	3.26	1.67	1.12	0.86	0.72	0.63	0.58	0.54
	0.9	9.02	2.64	1.41	0.97	0.77	0.66	0.59	0.54	0.51
	1.0	8.36	2.52	1.36	0.95	0.75	0.65	0.58	0.54	0.51
0.4	0.1	167.76	22.21	7.04	3.22	1.81	1.17	0.84	0.64	0.52
	0.2	78.99	12.25	4.42	2.26	1.39	0.97	0.74	0.60	0.50
	0.3	50.14	8.96	3.54	1.92	1.24	0.90	0.70	0.57	0.49
	0.4	36.26	7.32	3.08	1.74	1.16	0.85	0.67	0.56	0.48
	0.5	28.38	6.35	2.80	1.63	1.10	0.82	0.65	0.54	0.47
	0.6	23.50	5.72	2.61	1.54	1.05	0.79	0.63	0.53	0.46
	0.7	20.32	5.27	2.46	1.47	1.02	0.77	0.62	0.52	0.45
	0.8	14.94	4.13	1.98	1.21	0.85	0.65	0.53	0.46	0.40
	0.9	13.55	3.88	1.89	1.16	0.82	0.63	0.52	0.45	0.39
	1.0	12.66	3.69	1.80	1.12	0.79	0.62	0.51	0.44	0.39

# Datorberäkning

Matlabkod för FE-beräkning av grenade kanalsystem. Vid beräkning har CALFEM (Austrell, o.a., 2004) använts och tillämpats enligt (Ottosen & Petersson, 1992).

```
%diary nonlinear_FE_F_sys.log
%echo on
%-----
% ABK920: Degree in Building Services Engineering
% Exhaust System with respect to pressure drop in tees and elbows
% Non-linear analysis
% Model:  $K(Q) \cdot a = f$ ,  $\min|Q_n - Q_{n-1}|$ 
% Michael Molander V09
% Date: 2011-12-11
%-----
clc
clear all
close all
%-----
% The computation model: Exhaust-sys
%           (2)      (3)      (4)
%   [2]----[4]----[6]----[7] ->
%   |      |      |
% (1)|    (5)|    (6)|
%   |      |      |
%   [1]    [3]    [5]
%-----
%Topology matrix Edof
Edof=[1 1 2;
      2 2 4;
      3 4 6;
      4 6 7;
      5 3 4;
      6 5 6
      ];
%-----
%Element global coordinates
Ex=[0 0;0 10;10 20;20 40;10 10;20 20];
Ey=[-8 0;0 0;0 0;0 0;-8 0;-8 0];
%draw computation model
clf;
hfigure=figure(1);
plotpar=[1 2 2];%[2 1 0];
eldraw2(Ex,Ey,plotpar,Edof);
axis([-5 45 -10 5]), grid;
title('Frånluftssystem');
%-----
% Element properties
d=[0.160; %[m] element diameter
   0.160;
   0.250;
   0.250;
   0.160;
   0.160];

v=15.1e-6;%[m2/s] the air kinematic viscosity
rho=1.2;%[kg/m3] the air density
my=rho*v;%[Pa*s] air dynamic viscosity (my=rho*v)
```

```

Ndof=max(max(Edof));
[nbrOfrows,nbrOfcol]=size(Edof);
nbrOfElem=nbrOfrows;%number of elements
Ep=zeros(nbrOfElem,1);
k=ones(nbrOfElem,1);%[Ns/m5] flow resistance

lambda=0.02;%[-] Friction coefficient (spiral sheet steel pipe)
%Global stiffness matrix K.
K=zeros(Ndof);
L=zeros(nbrOfElem,1);
%-----
% The load vector, ie, known flows
%-----
f=zeros(Ndof,1);
f(1)=0.100;
f(3)=0.100;
f(5)=0.100;
Es=zeros(nbrOfElem,1);
Ed=zeros(nbrOfElem,1);
%-----
% Non-linear analysis: K(Q)*a=f
% Second order theory
%-----
% Start values
%-----
eps=0.00001; % Error norm
Q=[1 1 1 1 1 1]'; %Initial flow rates, initial values
Q0=[0.1 1 1 1 1 1]'; % Flows from the previous iteration
iter=0; % Iteration counter
iterMax=20;
%-----
% Iterations procedur
%-----
while(abs(Q(1)-Q0(1))>eps)
%-----
% Assemblering
%-----
iter=iter+1;

for i=1:nbrOfElem
%element length
L(i)=sqrt((Ex(i,2)-Ex(i,1))^2+(Ey(i,2)-Ey(i,1))^2);
%Darcy-Weisbach turbulent Pipe flow resistance
k(i)=8*lambda*rho*L(i)/(pi^2*d(i)^5);
Ep(i)=1/(k(i));

Ke=springle(Ep(i));
fe=[Es(i) -Es(i)]';
[K,f]=assem(Edof(i,:),K,Ke,f,fe);
end
%-----
% Boundary conditions, ie pressure drop
%-----
bc=[
    7 0;%reference pressure
];
%-----
% Solve the equationsystem

```

```

%-----
[a]=solveq(K,f,bc);%a=node pressure

%Node displacements obtained by using the function extract.
%ie, the pressure

Ed=extract(Edof,a);

%The spring forces is obtained by using the function springls
%ie, the flow
Es=zeros(nbrOfElem,1);
for i=1:nbrOfElem
    Es(i)=-springls(Ep(i,:),Ed(i,:));
end
Q0=Q;
Q=Es;
%-----
%Termination Tests
if (iter==iterMax)
    disp('The solution does not converges!')
    return
end
end

iter
Q
Ed
Es
%-----
%Pressure Drop Equations
%-----
dp=zeros(nbrOfElem,1);

for i=1:nbrOfElem
    dp(i)=k(i)*Q(i)^2;
end
dp
dp17=dp(1)+dp(2)+dp(3)+dp(4)+(20+5+2.6+5.5)
dp37=dp(5)+dp(3)+dp(4)+(20+12+5.5)
dp57=dp(6)+dp(4)+(20+10)
%--- END -----
echo off
diary off

```



# Matlabkod för approximativa beräkningsuttryck och diagram

```
%diary main_don.log
%echo on
%-----
%ABK920: Examensarbete i installationsteknik
% Frånluftsdon k-faktor,b-värde
% Michael Molander V09
% Date: 2011-11-21
%-----
% Plot av k-faktor, b-värdeför frånluftsdon KGEB 100,125 och 160
%-----
clc
clear all
close all
echo on
%-----
% Function plot of the function:
%  $y(x)=k*x+m$ 
% The function is plotted in the interval  $0 \leq x \leq 20$ .
%-----
%create x-values for y(x)
b100=[-14 -12 -9 -6 0 6];
b125=[-22 -18 -12 -6 0 6];
b160=[-24 -18 -12 -6 0 6];

%create y-values for y(x)
k100=[0.33 0.50 0.75 0.99 1.50 2.00];
k125=[0.88 1.30 1.80 2.40 2.90 3.40];
k160=[1.80 2.50 3.10 4.10 4.40 5.00];

%plot
hfigure=figure(1);
%
plot(b100,k100,'-*r')
% hold on
% plot(b125,k125,'-*g')
% hold on
% plot(b160,k160,'-*b')
%
% strTitle=sprintf('KGEB-100, KGEB-125, KGEB-160');
strTitle=sprintf('k-faktor som funktion av b-värde, KGEB-100');
title(strTitle);
xlabel('b-värde [mm]')
ylabel('k-faktor [-]')
grid on

% solve LSQ-system
x=b100';
y=k100';
[nbrOfrows100,nbrOfcol100]=size(x);
A=[ones(6,1) x];
ATA=A'*A;
ATy=A'*y;
%solve eq-system
c=A\y;
r=y-A*c;
```

```

c_100=c
rT=r';
rTr100=rT*r
%
x=b125';
y=k125';
[nbrOfrows125,nbrOfcol125]=size(x);
A=[ones(6,1) x];
ATA=A'*A;
ATy=A'*y;
%solve eq-system
c=A\y;
r=y-A*c;
c_125=c
rT=r';
rTr125=rT*r
%
x=b160';
y=k160';
[nbrOfrows160,nbrOfcol160]=size(x);
A=[ones(6,1) x];
ATA=A'*A;
ATy=A'*y;
%solve eq-system
c=A\y;
r=y-A*c;
c_160=c
rT=r';
rTr160=rT*r
%-----
% jämför data med approximation för KGEB-100
b=linspace(b100(1),b100(nbrOfrows100),100);
k=c_100(1)+c_100(2)*b;
hfigure=figure(hfigure+1);

plot(b100,k100,'-*r')
hold on
plot(b,k,'b')

strTitle=sprintf('k-faktor som funktion av b-värde, KGEB-100');
title(strTitle);
xlabel('b-värde [mm]')
ylabel('k-faktor [-]')
grid on

strLegend=sprintf('approximation: k=%6.4f+%6.4f*b,
r\''r=%6.4f',c_100(1),c_100(2),rTr100);
hlegend=legend('data',strLegend,2);
set(hlegend,'Location','SouthEast')
%-----
% jämför data med approximation för KGEB-125
b=linspace(b125(1),b100(nbrOfrows100),100);
k=c_125(1)+c_125(2)*b;
hfigure=figure(hfigure+1);

plot(b125,k125,'-*r')
hold on
plot(b,k,'b')

strTitle=sprintf('k-faktor som funktion av b-värde, KGEB-125');

```

```

title(strTitle);
xlabel('b-värde [mm]')
ylabel('k-faktor [-]')
grid on

strLegend=sprintf('approximation: k=%6.4f+%6.4f*b,
r\'\'r=%6.4f\'',c_125(1),c_125(2),rTr125);
hlegend=legend('data',strLegend,2);
set(hlegend,'Location','SouthEast')
%-----
% jämför data med approximation för KGEB-125
b=linspace(b160(1),b160(nbrOfrows100),100);
k=c_160(1)+c_160(2)*b;
hfigure=figure(hfigure+1);

plot(b160,k160,'-*r')
hold on
plot(b,k,'b')

strTitle=sprintf('k-faktor som funktion av b-värde, KGEB-160');
title(strTitle);
xlabel('b-värde [mm]')
ylabel('k-faktor [-]')
grid on

% str2='approximation: k=c1+c2*b';
% hlegend=legend('data',str2,2);
% set(hlegend,'Location','SouthEast')
strLegend=sprintf('approximation: k=%6.4f+%6.4f*b,
r\'\'r=%6.4f\'',c_160(1),c_160(2),rTr160);
hlegend=legend('data',strLegend,2);
set(hlegend,'Location','SouthEast')
%--- END -----
echo off
diary off

function dp90Bend
%ABK920: Examensarbete i installationsteknik
% Tryckfall i 90-rörböj
% Michael Molander V09
% Date: 2011-12-01
%-----
% Plot av R, q
%-----
clc
clear all
close all
echo on
%format long
format short
%-----
%create x-values for y(x)
q100=[10 15 20 30 40 50];
q125=[20 30 40 50 60 70];
q160=[15 20 30 40 50 60 70 80 90 100 150 200];
q200=[60 70 80 90 100 150 200];
q250=[100 150 200 300 400];
%create y-values for y(x)
dPt100=[0.7847 1.3638 2.3571 4.6091 7.5276 11.1563];

```

```

dPt125=[0.9776 1.8405 2.9681 4.3089 5.8097 7.5889];
dPt160=[0.2671 0.4261 0.7427 1.0562 1.4846 1.9970 2.6187 3.3327 4.0374
4.8600 10.1458 16.2111];
dPt200=[0.9055 1.0685 1.3536 1.6239 1.9350 3.9497 6.3869];
dPt250=[0.9382 1.7607 2.8480 5.5568 9.3191];
%-----
%plot: data
%-----
hfigure=figure(1);

plot(q100,dPt100,'-r')
hold on
plot(q125,dPt125,'-g')
hold on
plot(q160,dPt160,'-b')
hold on
plot(q200,dPt200,'-c')
hold on
plot(q250,dPt250,'-m')

strTitle=sprintf('Tryckfall som funktion av flöde:90-rörböj,d=100, d=125,
d=160, d=200, d=250');
title(strTitle);
xlabel('q [l/s]')
ylabel('dPt [Pa]')
grid on
hlegend=legend('d=100','d=125','d=160','d=200','d=250',5);
set(hlegend,'Location','SouthEast')
%-----
%plot: log-log data
%-----
hfigure=figure(hfigure+1);

plot(log10(q100),log10(dPt100),'-r')
hold on
plot(log10(q125),log10(dPt125),'-g')
hold on
plot(log10(q160),log10(dPt160),'-b')
hold on
plot(log10(q200),log10(dPt200),'-c')
hold on
plot(log10(q250),log10(dPt250),'-m')

strTitle=sprintf('90-rörböj,d=100, d=125, d=160, d=200, d=250');
title(strTitle);
xlabel('log10(q [l/s])')
ylabel('log10(dPt [Pa/m])')
grid on
hlegend=legend('d=100','d=125','d=160','d=200','d=250',5);
set(hlegend,'Location','SouthEast')
%
%-----
% approximering mha MKM(=LSQ)
% ansats:  $R=c_1*q^c_2$ 
% logaritmering:  $\log_{10}(R)=\log_{10}(c_1*q^c_2)=\log_{10}(c_1)+c_2*\log(q)$ 
% Jämför med räta linjens ekvation:  $y=k*x+m$ 
% dvs:
%  $y=\log_{10}(R)$ 
%  $k=c_2$ 
%  $x=\log_{10}(q)$ 
%  $m=\log_{10}(c_1)$ 

```

```

%solve LSQ-system
[c1_100,c2_100,rTr_100]=Solve90Bend(q100,dPt100);
[c1_125,c2_125,rTr_125]=Solve90Bend(q125,dPt125);
[c1_160,c2_160,rTr_160]=Solve90Bend(q160,dPt160);
[c1_200,c2_200,rTr_200]=Solve90Bend(q200,dPt200);
[c1_250,c2_250,rTr_250]=Solve90Bend(q250,dPt250);
%-----
% Plot: data+approximation
%-----
[hfig-
ure]=Plot90BendDataApprox(hfigure,q100,dPt100,c1_100,c2_100,rTr_100,100);
[hfig-
ure]=Plot90BendDataApprox(hfigure,q125,dPt125,c1_125,c2_125,rTr_125,125);
[hfig-
ure]=Plot90BendDataApprox(hfigure,q160,dPt160,c1_160,c2_160,rTr_160,160);
[hfig-
ure]=Plot90BendDataApprox(hfigure,q200,dPt200,c1_200,c2_200,rTr_200,200);
[hfig-
ure]=Plot90BendDataApprox(hfigure,q250,dPt250,c1_250,c2_250,rTr_250,250);

```

```
echo off
```

```

function [c1,c2,rTr]=Solve90Bend(q,dPt)
%-----
% approximering mha MKM(=LSQ)
% ansats: R=c1*q^c2
% logaritmering: log10(R)=log10(c1*q^c2)=log10(c1)+c2*log(q)
% Jämför med räta linjens ekvation: y=k*x+m
% dvs:
% y=log10(R)
% k=c2
% x=log10(q)
% m=log10(c1)
%
%solve LSQ-system
%-----
x=q';
y=dPt';
[nbrOfrows,nbrOfcol]=size(x);
A=[ones(nbrOfrows,1) log10(x)];
ATA=A'*A;
y=log10(y);
ATy=A'*y;
c=A\y;
c1=10^c(1);%antilogaritmering, basen 10!
c2=c(2);
r=y-A*c;
rT=r';
rTr=rT*r;
end

```

```

function [hfig-
ure]=Plot90BendDataApprox(hfigure,qData,dPtData,c1,c2,rTr,PipeSize)
%UNTITLED2 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
% hfigure=figure(hfigure+1);

```

```

% plot(qData,dPtData,'-*r')
%
% hold on
% [nbrOfrows,nbrOfcol]=size(qData');
% q=linspace(qData(1),qData(nbrOfrows),100);
% dPt=c1*q.^c2;
% plot(q,dPt,'-b')

strTitle=sprintf('90-rörbøj,d=%d',PipeSize);
title(strTitle);
xlabel('q [l/s]')
ylabel('dPt [Pa]')
grid on

strLegend=sprintf('approximation: dPt=%6.4f*q\%^6.4f,
r\''r=%6.4f',c1,c2,rTr);
hlegend=legend('data',strLegend,2);
set(hlegend,'Location','NorthWest')
end

```

## Referenser

- ASHRAE. (2009). *ASHRAE Handbook—Fundamentals (SI)*.
- Austrell, P.-E., Dahlblom, O., Lindemann, J., A Olsson, K.-G. O., Persson, K., & Petersson, H. (2004). *CALFEM A FINITE ELEMENT TOOLBOX*. Lund: Division of Structural Mechanics, LTH.
- Axel Bigélius, S. A. (1974). *VVS-Handboken, Tabeller och Diagram*. VVS-Tekniska Föreningen och Förlags AB VVS.
- Bigélius, A., & Svennberg, S. A. (1974). *VVS-Handboken, Tabeller och Diagram*. VVS-Tekniska Föreningen och Förlags AB VVS.
- Boverket. (2011). *BBR 18, BFS 2011:6*. Boverket.
- CADCOM. (den 28 10 2011). *CADCOM*. Hämtat från <http://www.cadcom.se> den 28 10 2011
- Cai, W., & Sen, M. (2010). *Nonlinear analysis of transient flow in a piping network*. University of Notre Dame, Notre Dame, IN 46556: Department of Aerospace and Mechanical Engineering.
- Enberg, H. (2009). *Minimikrav på luftväxling Utgåva 8*.
- Haghigi, K., Mohtar, R., Bralts, V., & Segerlind, L. (1991). A linear formulation model for pipe network components.
- Jensen, L. (1995). *Beräkningsuttryck för PFS*. LTH.
- Jensen, L. (1999). *Injustering*. LTH.
- Jensen, L. (2007). *Installationstekniska beräkningar med PFS*. Institutionen för bygg- och miljöteknologi, Avdelningen för installationsteknik. LTH.
- Jensen, L. (2007). *Krav på tryckfallsfunktioner för grenstycken, Rapport TVIT--07/7019*. LTH.
- K. Haghigi, R. M. (1991). A linear formulation model for pipe network components.
- Kocovic, A., & Fält, C. (2004). *Tryckfallsutredning av T-rör*. Institutionen för bygg- och miljöteknologi, Avdelningen för installationsteknik. LTH.
- Larock, B. E., Jeppson, R. W., & Watters, G. Z. (2000). *Hydraulics of Pipeline Systems*. CRC Press.
- Ottosen, N., & Petersson, H. (1992). *Introduction to the Finite Element Method*.
- Street, & Vennard. (1982). *Elementary Fluid Mechanics*. Wiley & Sons.
- Warfvinge, C., & Dahlblom, M. (2010). *Projektering av installationer i byggnader*. Studentlitteratur.