



LUND UNIVERSITY

Täthet och tryckfall i trapphus - Fullskaleförsök

Jensen, Lars

2005

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Jensen, L. (2005). *Täthet och tryckfall i trapphus - Fullskaleförsök*. (TVIT; Vol. TVIT-7002). Avd Installationsteknik, LTH, Lunds universitet.

Total number of authors:

1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

Täthet och tryckfall i trapphus - Fullskaleförsök

Lars Jensen

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet, 2005
Rapport TVIT--05/7002



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 som ger bra inneklimat i samverkan med byggnaden.

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 rök-spridning 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 spargasmetod.

Täthet och tryckfall i trapphus - Fullskaleförsök

Lars Jensen

© Lars Jensen, 2005

ISRN LUTVDG/TVIT--05/7002--SE(45)

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

Innehållsförteckning

1	Inledning	5
2	Trapphus	7
3	Provtryckning av trapphus	11
	Trapphus Mitt 2005-01-27 - provisorisk tätning	12
	Trapphus Mitt 2005-03-09 - stängda hissplansdörrar	13
	Trapphus Mitt 2005-03-09 - öppna hissplansdörrar	14
	Trapphus Söder 2005-02-04	15
	Trapphus Söder 2005-02-22 - opåverkade dörrar	16
	Trapphus Söder 2005-02-04 - utkilade dörrar	17
	Trapphus Söder 2005-02-04 - igendragna dörrar	18
	Trapphus Söder 2005-02-04 - tejpade dörrar	19
	Trapphus Väster 2005-02-22	20
	Dörrarnas inverkan på läckaget	20
	Uppsummering av provtryckning och lufttäthet	22
4	Bestämning av lufttäthet hos trapphus	23
	Fyra strömningstekniska modeller	23
	En numerisk modell	29
	Felkälla vid provtryckning av höga byggnader	30
5	Provflödning av trapphus	33
	Trapphus Mitt 2005-01-27 - förförsök	33
	Trapphus Mitt 2005-03-09 - huvudförsök	33
6	Bestämning av tryckfall i trapphus	37
7	Bestämning av värmeöverföring i trapphus	41
8	Sammanfattning och slutsatser	43
9	Referenser	45

1 Inledning

Trapphus används i flerplansbyggnader för utrymning vid brand. Trycksättning av trapphus används för att hindra brandgasspridning till trapphus från brandutsatta våningsplan och därmed underlätta utrymning. Ett brandgasfritt trapphus underlättar också räddnings- och släckningsinsatser. Det finns idag ett växande intresse för att bygga höga byggnader.

Problemet med trycksättning av trapphus är att övertrycket begränsas neråt av en minsta tryckskillnad omkring 20 Pa för att förhindra brandgasspridning till trapphuset, uppåt av en högsta tryckskillnad omkring 80 Pa för att dörrar till trapphuset skall kunna öppnas med rimlig kraft och av att tryckskillnaden mellan trapphuset och våningsplanen ändras med höjden. Trycket på varje våningsplan antas vara lika med trycket ute. En innetemperatur på 20 °C och en utetemperatur på -23 °C ger en termisk tryckskillnad på 2 Pa/m. För de här angivna siffervärdena begränsas trapphushöjden för ett trapphus till högst 30 m $((80-20)/2)$.

Amerikansk praxis är att dela upp trapphus i sektioner om normalt 8 våningsplan och ibland upptill 12 våningsplan. Högre trapphus måste därför alltid sektioneras tror man. Det finns dock en förbisedd lösning på detta problem. Den normala termiska tryckökningen uppåt kan vintertid elimineras med ett genom trapphuset nerifrån och uppåt genomströmmande flöde som skapar ett tryckfall per höjdmeter lika med den termiska tryckändringen per höjdmeter.

Ett trapphus behöver alltså inte sektioneras för att klara av det tillåtna övertrycksintervallet. En tilläggsförutsättning är dock att trapphusets normala och totala läckflöde är betydligt mindre än det flöde som krävs för att skapa det kompenserande strömningstryckfallet.

Syftet med denna delrapport är att bestämma lufttätheten för trapphus och tryckfallet i trapphus. Möjligheterna att trycksätta höga trapphus avsedda för utrymning bestäms till en väsentlig del av dessa två egenskaper.

Trapphusets lufttäthet bestäms i princip av trapphusdörrarnas lufttäthet i de fall trapphuset är av platsgjuten betong. Andra läckage än trapphusdörrar är ventilationsanordningar och genomföringar för el för belysning. En god lufttäthet är viktig för att kunna trycksätta ett högt trapphus med ett rimligt flöde. Ett helt tätt trapphus kan i princip vara oändligt högt.

Trapphusets tryckfall bestäms i huvudsak av olika engångsförluster för riktningförändringar och kontraktioner. Ett högt tryckfall orsakat av ett uppåtgående och genom trapphuset strömmande flöde motverkar den termiska tryckgradienten och möjliggör att trycksätta högre trapphus än fallet utan ett genomströmmande flöde eftersom läckflödet endast skapar ett obetydligt tryckfall.

Den största trapphushöjden som kan trycksättas med ett genomströmmande flöde beror på flera parametrar bland annat trapphusets lufttäthet och tryckfall. Det går att visa både teoretiskt och genom simulering att den största trapphushöjden är proportionell mot det nominella läckageflödet per meter upphöjt till -0.5, vilket innebär att en god täthet ökar den möjliga trapphushöjden. Samma proportionalitet för trapphusets tryckfall är upphöjt till -0.25, vilket också innebär att ett lågt tryckfall ökar den möjliga trapphushöjden.

Det nödvändiga genomströmmande flödet är proportionellt mot trapphusets tryckfall upphöjt till -0.5, vilket för ett lågt tryckfall innebär ett stort genomströmmande flöde. Det finns därför

för en given trapphushöjd och en given lufttäthet ett största trapphustryckfall som ger ett minsta nödvändigt genomströmmande flöde.

Ett trapphus kan ha heltrappor eller halvtrappor. Det senare innebär ett viloplan halvvägs mellan våningsplanen och ett mera kompakt trapphus. Ett trapphus kan vara öppet utan någon mittvägg eller slutet med en mittvägg. Det senare innebär att trapplöpen omges av väggar på båda sidor. Detta ökar tryckfallet något eftersom luftströmningen inte kan ta genvägar. En viktig förutsättning för att ett trapphus skall ha ett påtagligt tryckfall är att trapplöpen och våningsplan och viloplan täcker hela trapphusets bottenyta. Trapphuset skall vara utan frittfallvolym.

I byggnader med stora våningshöjder kan en trappa bestå av två eller fler egna våningsplan. Den egentliga våningshöjden är därför ointressant utan det som räknas är trappans våningsplan.

Ett högt trapphus som försöksobjekt är en fördel om tryckfallet i själva trapphuset skall bestämmas. Det relativa mätfelet minskar ju flera våningsplan som tryckfallsmätningen sker över. Ett högt trapphus med möjlighet att ordna självdragsventilation in genom en öppen dörr på bottenplanet och ut genom någon form av taklucka till det fria är ett bra försöksobjekt.

In- och utströmningsförlusterna kan vara betydligt större än tryckförlusterna för flera våningsplan. Genomströmningen vid självdrag blir därför större i ett högt än i ett lågt trapphus med samma in- och utströmningsöppningar.

En stor temperaturskillnad mellan inne och ute är också en fördel. Luftflöden på ett flertal m^3/s krävs för att skapa tryckfall i storleksordningen $1 \text{ Pa}/\text{m}$. En tillgänglig provtryckningsutrustning klarar något över $3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ett högt trapphus är också en fördel för att bestämma ett bra medelvärde för dörrarnas lufttäthet. Den tillgängliga provtryckningsutrustningen lämpar sig inte för att bestämma läckaget för en enstaka dörr. Den nedre flödesgränsen är $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ med rimlig mätnoggrannhet.

Försöksobjekt har varit tre av fyra trapphus i Sysav:s nya sopförbränningsanläggning, Spillepengen i Malmö. Trapphusen beskrivs i avsitt 2.

Provtryckningarna beskrivs i avsnitt 3 och har genomförts av Lars Ohlsson, avdelningen för byggnadsfysik. Bestämning av lufttäthet hos trapphusdörrar redovisas i avsnitt 4.

Provflödningar beskrivs i avsnitt 5 och har genomförts av Jonas Lindhe, avdelningen för installationsteknik. Bestämning av tryckfall i trapphus redovisas i avsnitt 6.

Ett stort tack går till Sysav utan vars medverkan det inte hade varit möjligt att kunna bestämma täthet för och tryckfall i flera höga trapphus. Särskilt tack till Jan Johansson på Sysav som tagit fram olika underlag för trapphusen och hjälpt till vid förberedelser av mätförsöken.

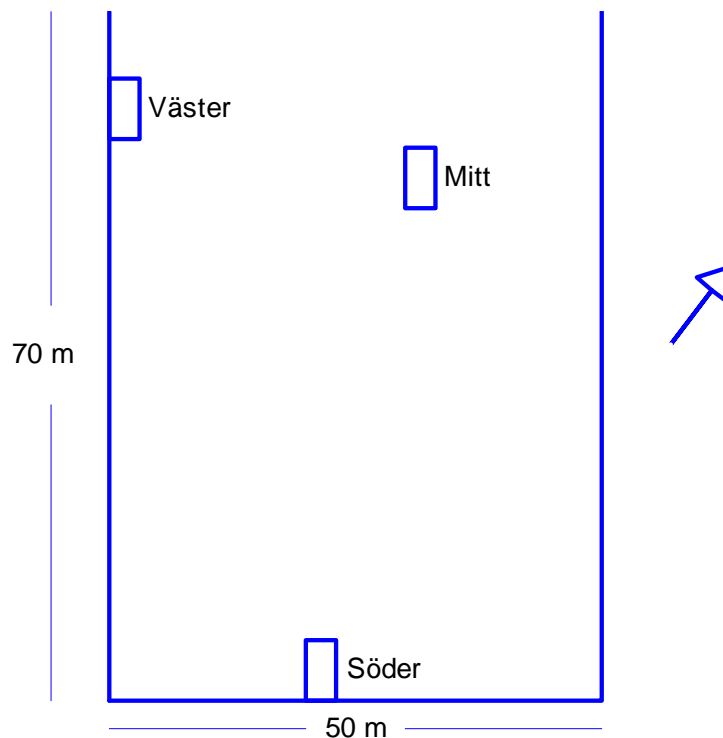
2 Trapphus

Sysav:s nya sopförbränningsanläggning på Spillepengen, Malmö, med byggår 2001 har fyra höga trapphus, vilka ligger inuti byggnaden som har längden 150 m, bredden 50 m och höjden 41 m. En planskiss för den sydöstra och knappt halva byggnaden i Figur 2.1 visar de tre undersökta trapphusens placering och beteckning. Data för de fyra trapphusen redovisas i Tabell 2.1-4. Det som skiljer något kan vara trapphushöjden, antalet våningsplan, antalet inåt- och utåtgående dörrar och våningshöjderna. Alla trapphusen är platsgjutna.

Trapphus Mitt har genomgående dörrar mot hissplan med mindre två hissar respektive en större hiss, medan trapphusen Väster och Söder har direkt förbindelse till själva hallen. Våningsplan eller dörrplan, egentligen våningsplan med dörrar, har nummerats efter antalet par halvtrappor med markplanet som 10 och med plushöjden 3.0 m.

Tre trapphus har provtryckts för att bestämma tätheten, vilket beskrivs i avsnitt 3 och 4

Trapphus Mitt har använts för att mäta tryckfallet vid självdragsventilation, här benämnt provflödning. Detta beskrivs i avsnitt 5 och 6. Provflödningen har underlättats genom att glänta en port nära trapphus Mitt och en annan port intill trapphus Söder för att få ner neutrallagret för tryckskillnaden inne-ute till golv/marknivå.



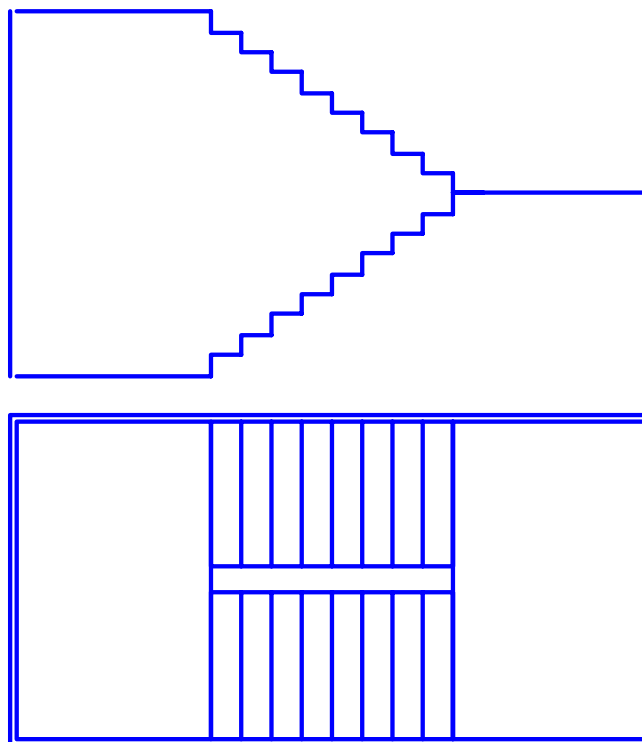
Figur 2.1 Planskiss för halva byggnaden med de tre undersökta trapphusen.

De olika trapphusen har alla samma trappbredd 1200 mm och en inre trapphusbredd 2700 mm. Den inre trapphuslängden varierar något från 5560 till 5660 mm. Trapphusen har ingen mittvägg utan en fri öppning mellan trapplöpen på 220 mm. En del av detta utrymme täcks av ett trappräcke som för ett våningsplan är uppbyggt av 7 m rör i dimension 34 mm i huvudsak som ledstång, 32 m rundstång med dimensionen 12 mm som spjälor och 6 m plattjärn 35x10 mm. Det tillkommer också 5 m räcke på trapphusväggarna.

Alla trapplöp är endast fastsatta i våningsplanen eller viloplanen. Varje vånings- eller viloplan är endast fastsatt i fyra punkter i själva trapphusväggen. Det finns därför en omkring 40 mm bred glipa mellan trapphusväggarna och själva trapporna med vånings- och viloplan bortsett från åtta mindre bärande förbindningar och i anslutning till dörrar.

Trappstegen har en steghöjd på 167 mm eller 6 steg per meter och en steglängd på 250 mm. Detta ger en stigning på 2:3. Antalet steg per halvtrappa är 8, 9 eller 10. Trapplöpen har en slät undersida.

Alla dörrar har varit av samma fabrikat Daloc och genomgående inåtgående på övre plan och utåtgående på nedersta plan. Dörrarnas invändiga karminnermått är bredd 900 mm och höjd 2020 mm. Dörrarna är placerade i en dörrnisch med ett djup på 180 mm, en bredd på 1010 mm och en höjd på 2100 mm. Dörrbladets överlappning är 10 mm. Dörrarna är i stålplåt och utan några tätningslister.



Figur 2.2 Sektion och plan för halvtrappa för våningshöjd 3 m med trappbredd 1.2 m.

Alla trapphus är försedda med en stigarledning med anslutning 80 och en ytterdiametern om 90 mm för ett brandpostsystem. Ledningen går igenom viloplanen nära ett trapphushörn och genom ett hål med diametern 150 mm.

Alla trapphus har en belysningsarmatur per halvplan, våningsplan eller viloplan. Elförsörjningen sker genom ingjutna tomrör, vilket kan ge ett visst läckage.

Tabell 2.1 Data för trapphus Mitt

dörrplan	plushöjd m	antal steg nästa dörrplan	antal dörrar inåt/utåt	övrigt
tak	51.23			inspektionslucka 900x900 mm brandlucka 1000x1000 mm brandgasspjäll 400 mm hissmaskinrumsdörr
25.0	48.83	-	1/0	
23.5	43.50	9+9+8	1/0	
22.0	38.67	10+10+9	1/1	
20.5	34.67	8+8+8	1/0	
19.5	31.67	9+9	1/0	
18.5	28.67	9+9	1/0	
17.5	23.33	10+10	1/0	
15.5	19.50	9+9+9+8	1/0	
14.0	15.00	9+9+9	1/0	
12.0	9.00	9+9+9+9	1/0	
10.0	3.00	9+9+9+9	0/2	brandgasspjäll 200 mm
summa			10/3	

Tabell 2.2 Data för trapphus Norr

dörrplan	plushöjd m	antal steg nästa dörrplan	antal dörrar inåt/utåt	övrigt
tak	51.83			brandgasfläkt med otäta genomföringar för kylluft och brandgasluft
25.0	48.83	-	1/0	
23.5	43.50	9+9+8	1/0	
22.0	38.67	10+10+9	1/1	
20.5	34.67	8+8+8	1/0	
19.5	31.67	9+9	1/0	
18.5	28.67	9+9	1/0	
17.5	23.33	10+10	1/0	
15.5	19.50	9+9+9+8	1/0	
14.0	15.00	9+9+9	1/0	
12.0	9.00	9+9+9+9	1/0	
10.0	3.00	9+9+9+9	0/2	
summa			10/3	

Tabell 2.3 Data för trapphus Söder

dörrplan	plushöjd m	antal steg nästa dörrplan	antal dörrar inåt/utåt	övrigt
tak	35.7			avluftsventil 630 mm
20.0	33.0	-	1/0	
19.0	30.0	9+9	2/0	
18.0	27.0	9+9	1/0	
17.0	24.0	9+9	1/0	
16.0	21.0	9+9	2/0	
15.0	18.0	9+9	1/0	
13.0	12.0	9+9+9+9	1/0	
12.0	9.0	9+9	1/0	genomgång av rör för trycksatt VV och KV
10.0	3.0	9+9+9+9	1/2	uteluftsventil 270 mm en ytterdörr något skadade trösklar utåt
summa			11/2	

Tabell 2.4 Data för trapphus Väster

dörrplan	plushöjd m	antal steg nästa dörrplan	antal dörrar inåt/utåt	övrigt
tak	41.67			avluftsventil 630 mm
23.0	38.17	-	1/0	
21.5	34.17	8+8+8	1/0	
20.0	30.17	8+8+8	1/0	
19.0	27.17	9+9	1/0	
18.0	24.17	9+9	1/0	
17.0	20.83	10+10	1/0	
15.5	16.50	8+9+9	1/0	
14.0	12.00	9+9+9	1/0	
12.0	6.00	9+9+9+9	2/0	
10.0	3.00	9+9+9+9	0/2	uteluftsventil 270 mm en ytterdörr något skadade trösklar utåt
9	0.67	14	1/0	vinkeltrappa
summa			11/2	

3 Provtryckning

I de följande underavsnitten redovisas de genomförda provtryckningarna trapphusvis och kronologiskt. En sammanställning ges i Tabell 3.1 nedan. Antalet trycksatta dörrar kan variera eftersom några utåtgående dörrar har tejpats i senare försök. En inåtgående dörr används alltid för själva provtryckningen.

Tabell 3.1 Provtryckningar och antalet trycksatta och otejpade dörrar inåt/utåt

trapphus	datum	mätserie	antal in/ut	Figur	kommentar
Mitt	2005-01-27	1-4	10/2	3.1	provisorisk tätning
Mitt	2005-03-09	29-32	10/2	3.2	stängda hissplansdörrar
Mitt	2005-03-09	33-36	10/2	3.3	öppna hissplansdörrar
Söder	2005-02-04	5-10	10/2	3.4	
Söder	2005-02-22	11-14	10/1	3.5	opåverkade dörrar
Söder	2005-03-02	19-22	10/1	3.6	inåt pressade dörrar
Söder	2005-03-02	23-26	10/1	3.7	utåt pressade dörrar
Söder	2005-03-02	27-28	0/0	3.8	tejpade dörrar
Väster	2005-02-22	15-18	11/0	3.9	

Provtryckningen sker med en för ändamålet särskilt framtagen utrustning som kan placeras i en dörröppning bestående en ställbar ram, en lufttät duk, en axialfläkt med flödesreglering och en tryckgivare. Utrustningen är tillverkad av The Energy Conservatory och finns beskriven i manual Minneapolis Blower Door (1993). Axialfläkten kan förses med olika strypringar betecknade A, B och C och motsvarande flödesintervall redovisas i Tabell 3.2 och även för fallet utan strypring. Fläkten vänds för att byta från över- till undertrycksmätning.

Tabell 3.2 Flödesgränser för olika strypringar och parametrar a och b för (3.1)

strypring	flöde m^3/s vid trycksignal 25 Pa	flöde m^3/s vid trycksignal 400 Pa	parameter a	parameter b
-	1.127	4.604	0.2198	0.5077
A	0.417	1.634	0.0856	0.4922
B	0.137	0.554	0.0272	0.5029
C	0.054	0.231	0.0098	0.5275

Fläktens varvtal anpassas för att kunna läsa av flödet vid en tryckskillnad av var 5:te Pa upptill 60 Pa. Flödet bestäms med ett direktvisande instrument med en kalibrerad tryckmätning på själva fläktmotorn före själva fläkthjulet och gentemot omgivningen utom för strypring C. Flödet q bestäms i detta fall med den avlästa flödesbestämmande tryckskillnaden över fläkten Δp och ett enkelt beräkningsuttryck enligt nedan och parametrarna a och b enligt Tabell 3.2 ovan.

$$q = a \Delta p^b \quad (m^3/s) \quad (3.1)$$

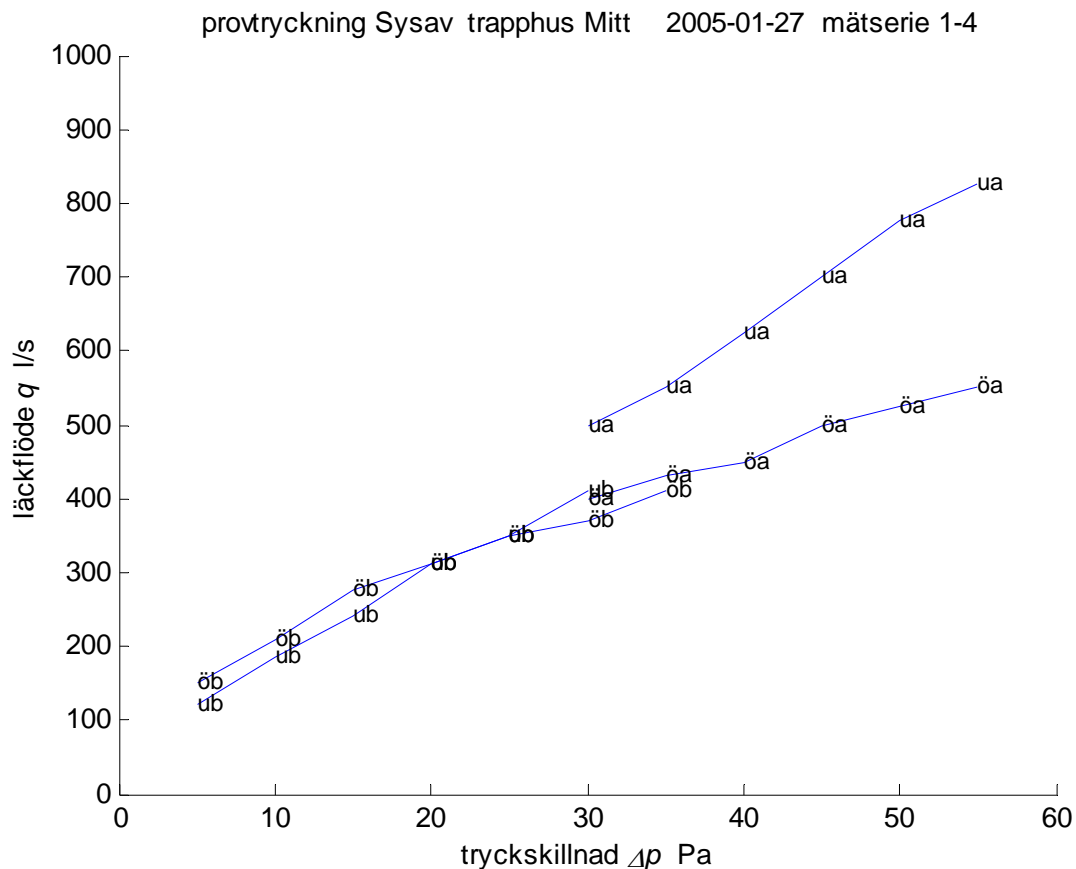
Trapphus Mitt 2005-01-27 - provisorisk tätning

Vid uppstart av provtryckningen erhöles först inget mottryck. Efter okulär besiktning av hela trapphuset hittades en läckande mindre genomföring på plan 17 och ett byggfel i form av en större förbindelse mellan trapphuset och den stora hallen med längden 4000 mm och bredden 100 mm. De två läckorna tätades med byggplast och silvertejp. Provtryckning startade med övertryck för att tejpningen klarade denna belastning bättre än vid undertryck.

Mätdata för mätserie 1-4 redovisas i Figur 3.1 för både över- och undertryck med *öa* och *öb* för övertryck för ring A och B och med *ua* och *ub* för undertryck för ring A och B.

Mätpunkterna i Figur 3.1 visar att det är en betydande skillnad i tätheten mellan stora över- och undertryck. En förklaring är att tätningen inte klarade av det stora undertrycket utan att tejpningen började släppa. En grov uppskattning av läckaget per dörr är omkring 40 l/s vid 50 Pa tryckskillnad för totalt 12 dörrar och utan hänsyn till mätserie 4 eller *ua*.

Antalet trycksatta dörrar var tolv varav tio inåtgående och två utåtgående på bottenplanet.



Figur 3.1 Mätdataserie 1-4 från provtryckning av trapphus Mitt 2005-01-27 med byggfel.

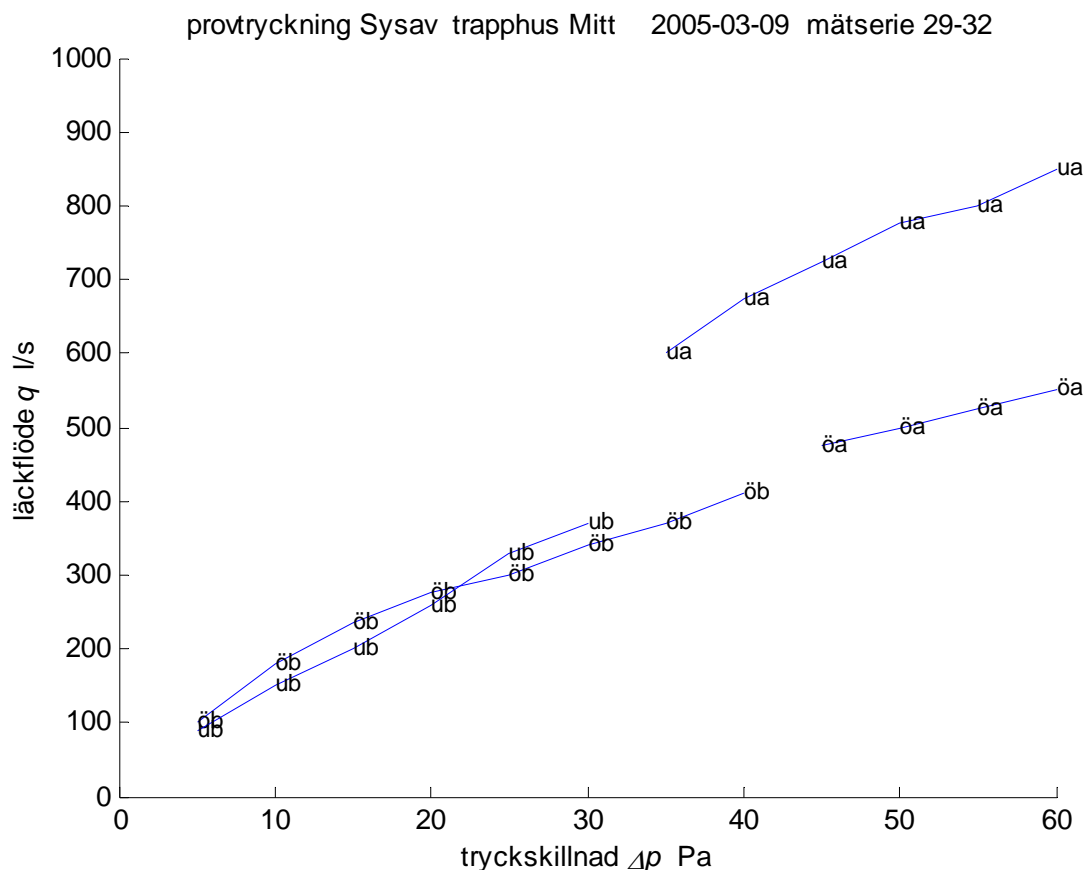
Trapphus Mitt 2005-03-09 - stängda hissplansdörrar

Syftet med provtryckningen var att kontrollera trapphusets täthet efter det att en stor otäthet högst upp i trapphuset lagats.

Mätdata för mätserie 29-32 redovisas i Figur 3.2 för både över- och undertryck med *öa* och *öb* för övertryck för ring A och B och med *ua* och *ub* för undertryck för ring A och B.

Resultatet i Figur 3.2 och kan jämföras med den tidigare provtryckningen 2005-01-27 i Figur 3.1 bortsett från mätserie 4 där den provisoriska tätningen inte klarade undertrycket. Läckaget har minskat, vilket framgår för tre av fyra mätserier utom för mätserie *ua*. Det finns också en orimlig ökning av läckflödet mellan mätserie *ub* och *ua*. En förklaring kan vara att differenstryckgivaren för flödesmätningen hängde sig vid flera tillfällen under provtryckningen. Orsaken till dessa konstigheter har inte kunnat klarläggas.

Antalet trycksatta dörrar var tolv varav tio inåtgående och två utåtgående på bottenplanet.



Figur 3.2 Mätdataserie 29-32 från provtryckning av trapphus Mitt 2005-03-09 efter åtgärd av byggfel.

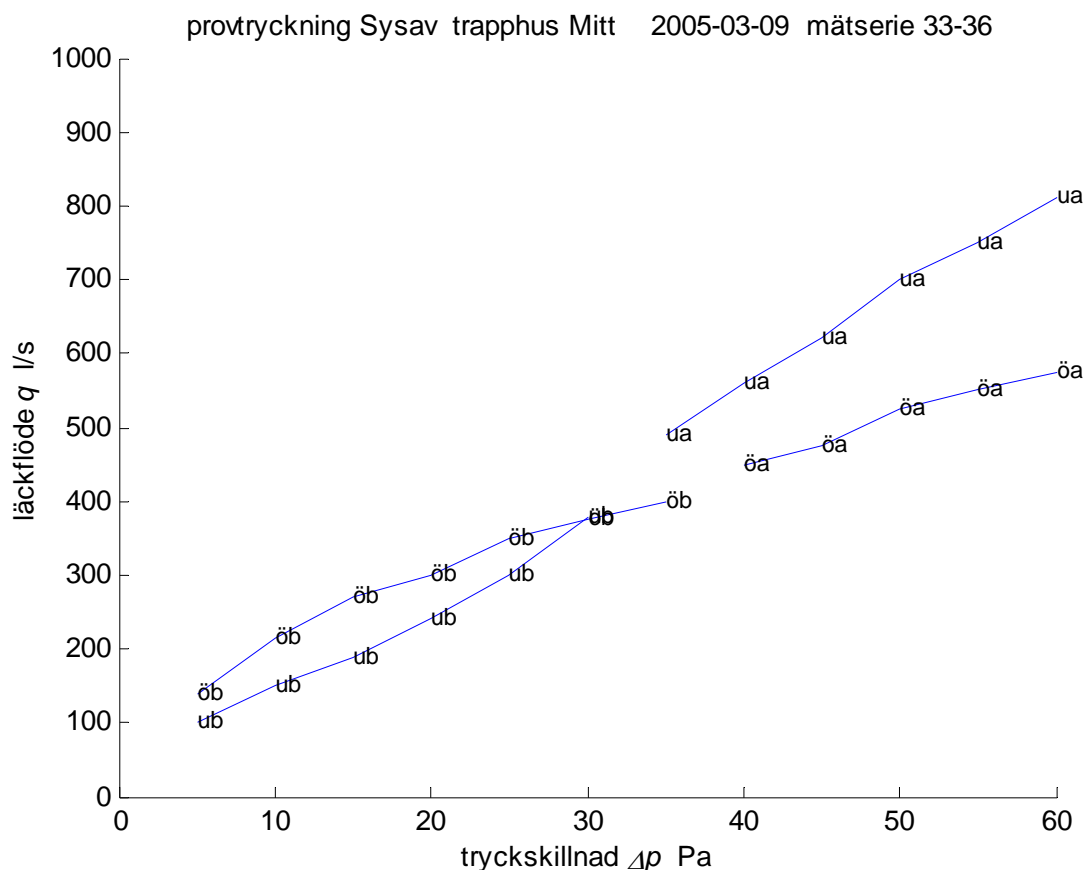
Trapphus Mitt 2005-03-09 - öppna hissplansdörrar

Något som kan påverka provtryckning är att trapphuset har ett stort antal dörrar som inte går direkt ut i den stora hallen utan går till olika hissplan. De olika hissplanen har i sin tur dörrar som går direkt ut i den stora hallen. Trapphusets lufttäthet kan därför överskattas eftersom läckaget sker genom flera dörrar i serie mellan trapphus och den stora hallen.

Hisschaktet kan vara otätt och då blir det ingen skillnad. Hissdörrarna av skjuttyp är mycket otäta jämfört med trapphusdörrarna av slagtyp.

Denna provtryckning som redovisas här görs därför med öppna hissplansdörrar in mot den stora hallen. Antalet trapphusdörrar som går till hissplan är dock endast två varför effekten kan förväntas bli marginell jämfört med den tidigare provtryckningen med stängda hissplansdörrar. Antalet trycksatta dörrar var tolv varav tio inåtgående och två utåtgående.

Resultatet för både övertryck och undertryck redovisas i Figur 3.3 på samma sätt som tidigare för mätserie 33-36 och kan jämföras med den tidigare provtryckningen i Figur 3.2. Resultatet skiljer sig inte mycket från det med stängda hissplansdörrar. Mätserie ua avviker på samma sätt som tidigare.



Figur 3.3 Mätdataserie 33-36 från provtryckning av trapphus Mitt 2005-03-09 efter åtgärd av byggfel och med öppna dörrar mellan hissplan och den stora hallen.

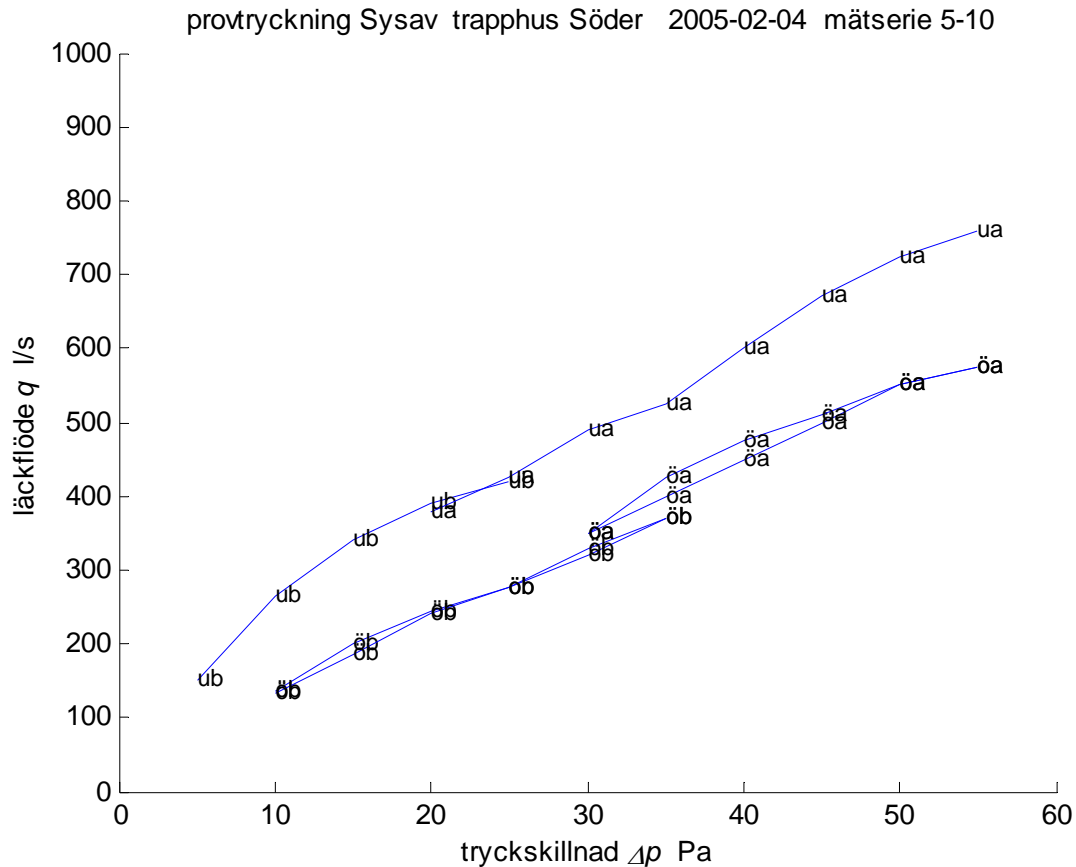
Trapphus Söder 2005-02-04

Innan provtryckningen tätades en ventilationsöppning överst i trapphuset ut mot det fria med diametern 630 mm med byggplast och silvertejp. Provtryckning startade med övertryck för att tejpningen klarade denna belastning bättre än vid undertryck.

Mätdataserie 5-10 redovisas i Figur 3.4 för både över- och undertryck med $\ddot{o}a$ och $\ddot{o}b$ för övertryck för ring A och B och med ua och ub för undertryck för ring A och B.

Antalet trycksatta dörrar var tolv varav tio inåtgående och två utåtgående på bottenplanet. En något dold uteluftsventil i bottenplanet var öppen med en medelöppning på 8 mm.

Mätdata i Figur 3.4 visar att trapphusets läckflöde är betydligt större vid undertryck än vid övertryck. En förklaring kan vara att av de trycksatta trapphusdörrarna är tio inåtgående och två är utåtgående. En inåtgående trapphusdörr kan vara något självtätande vid övertryck och tvärtom vid undertryck.



Figur 3.4 Mätdataserie 5-10 från provtryckning av trapphus Söder 2005-02-04.

Trapphus Söder 2005-02-22 - opåverkade dörrar

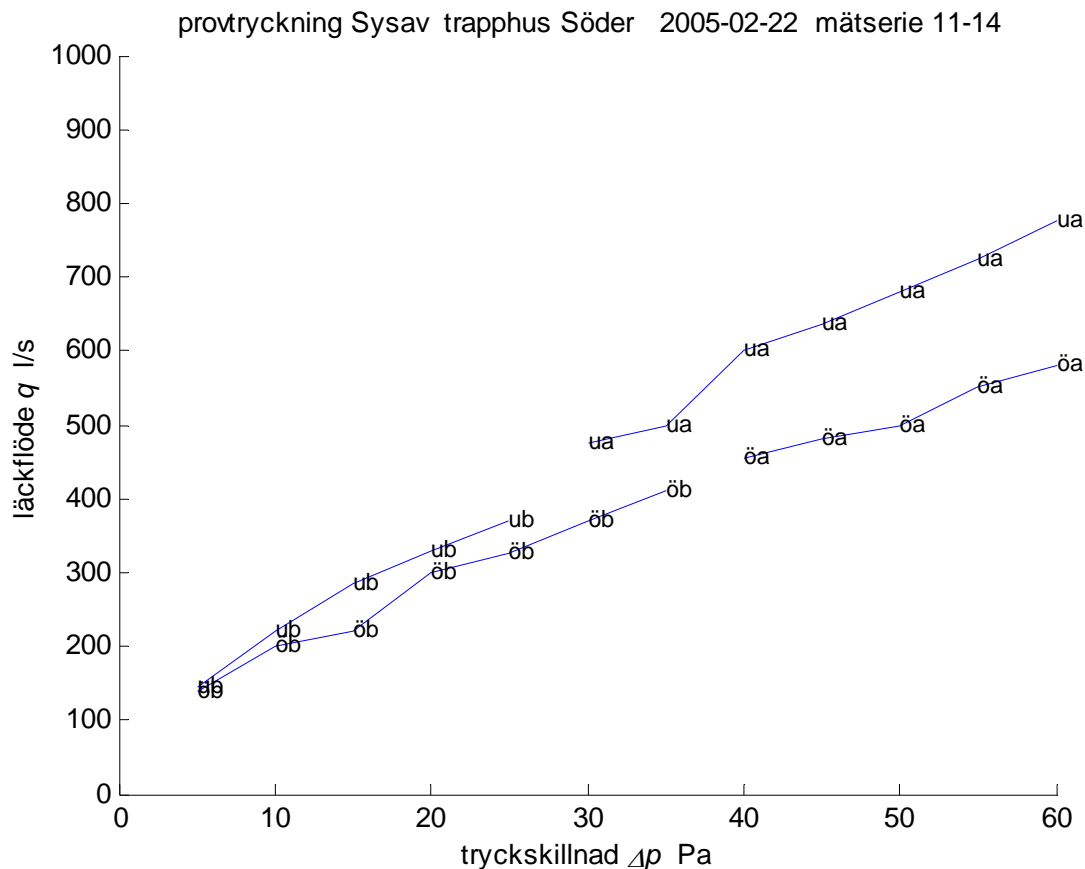
Syftet med denna provtryckning var att kontrollera den stora skillnaden mellan över- och undertryck för mätserie 5-10 tidigare redovisad i Figur 3.4.

Innan provtryckningen tätades en ventilationsöppning ut mot det fria med diametern 630 mm med ett tätningslist försett lock med diametern 750 mm.

Mätdataserie 11-14 redovisas i Figur 3.5 betecknat på samma sätt som tidigare.

Antalet trycksatta dörrar var tio inåtgående och en utåtgående. En utåtgående trapphusdörr på bottenplanet tejpades eftersom tröskeln var något skadad. En något dold uteluftsventil i bottenplanet var öppen med en medelöppning på 8 mm.

Det var också enkelt att se att de inåtgående trapphusdörrarnas läge ändrades av tryckförhållanden genom att upprepade gånger starta och stoppa fläkten vid undertryckskoppling.



Figur 3.5 Mätdataserie 11-14 från provtryckning av trapphus Söder 2005-02-22.

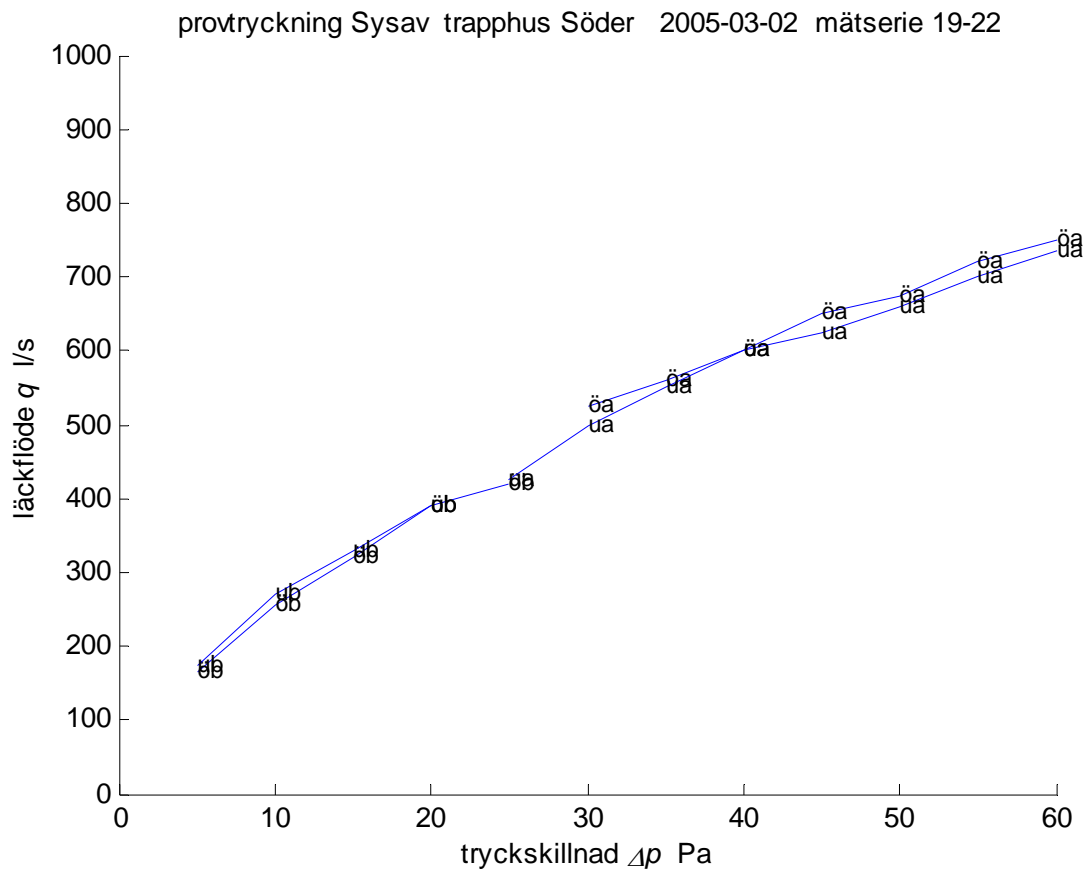
Trapphus Söder 2005-03-02 - utkilade dörrar

Syftet med denna provtryckning var att undersöka läckflödet om alla trapphusdörrar tvingades ut maximalt för att få största möjliga läckage. Dörrarnas läge fixerades med en kil per dörr. Kilen placerades nära låskolven för att inte skeva dörren.

Innan provtryckningen tätades en ventilationsöppning ut mot det fria med diametern 630 mm med ett tätningslist försett lock med diametern 750 mm. Uteluftsventilen i bottenplanet stängdes.

Mätdataserie 19-22 redovisas i Figur 3.6 betecknat på samma sätt som tidigare.

Antalet trycksatta dörrar var tio inåtgående och en utåtgående. En utåtgående trapphusdörr på bottenplanet tejpades eftersom tröskeln var något skadad.



Figur 3.6 Mätdataserie 19-22 från provtryckning av trapphus Söder 2005-03-02 med trapphusdörrar fixerade med kilar.

Trapphus Söder 2005-03-02 - igendragna dörrar

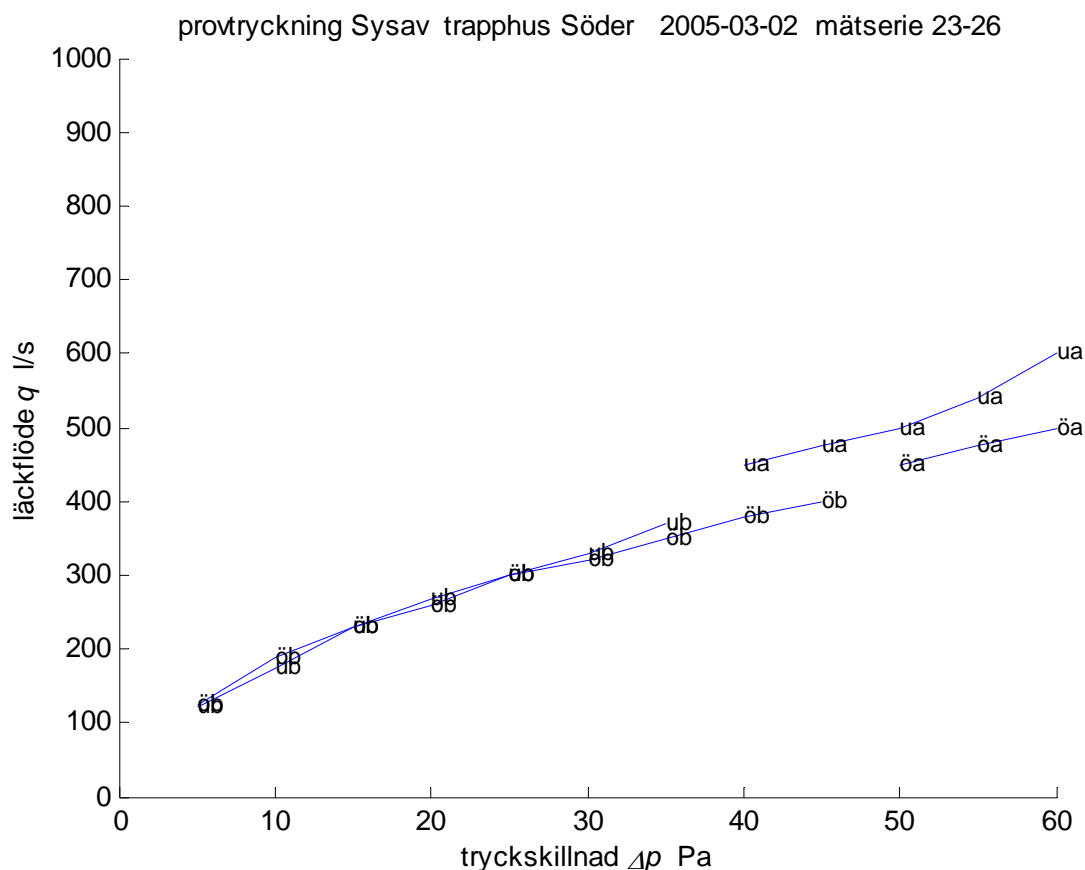
Syftet med denna provtryckning var att undersöka läckflödet om alla trapphusdörrar drogs igen maximalt för att få minsta möjliga läckage. En viktig anmärkning är att en bra igendragen dörr bara blir något tätare eftersom dörrens gångjärnssida inte påverkas.

En cykelslang förankrades i dörrhandtaget och i ett skyddsräcke utanför trapphuset för att skapa den nödvändiga igendragningskraften. Den förspända cykelslangens dragkraft har uppmätts till omkring 80 N. Denna kraft räcker till för att balansera en tryckskillnad på 80 Pa för en dörr med en yta på 2 m². Gångjärnen tar upp halva lasten.

Innan provtryckningen tätades en ventilationsöppning ut mot det fria med diametern 630 mm med ett tätningslist försett lock med diametern 750 mm. Uteluftsventilen i bottenplanet stängdes.

Mätdata serie 23-26 redovisas i Figur 3.7 betecknat på samma sätt som tidigare.

Antalet trycksatta dörrar var tio inåtgående och en utåtgående. En utåtgående trapphusdörr på bottenplanet tejpades eftersom tröskeln var något skadad.



Figur 3.7 Mätdata serie 23-26 från provtryckning av trapphus Söder 2005-03-02 med trapphusdörrar fixerade med cykelslangar.

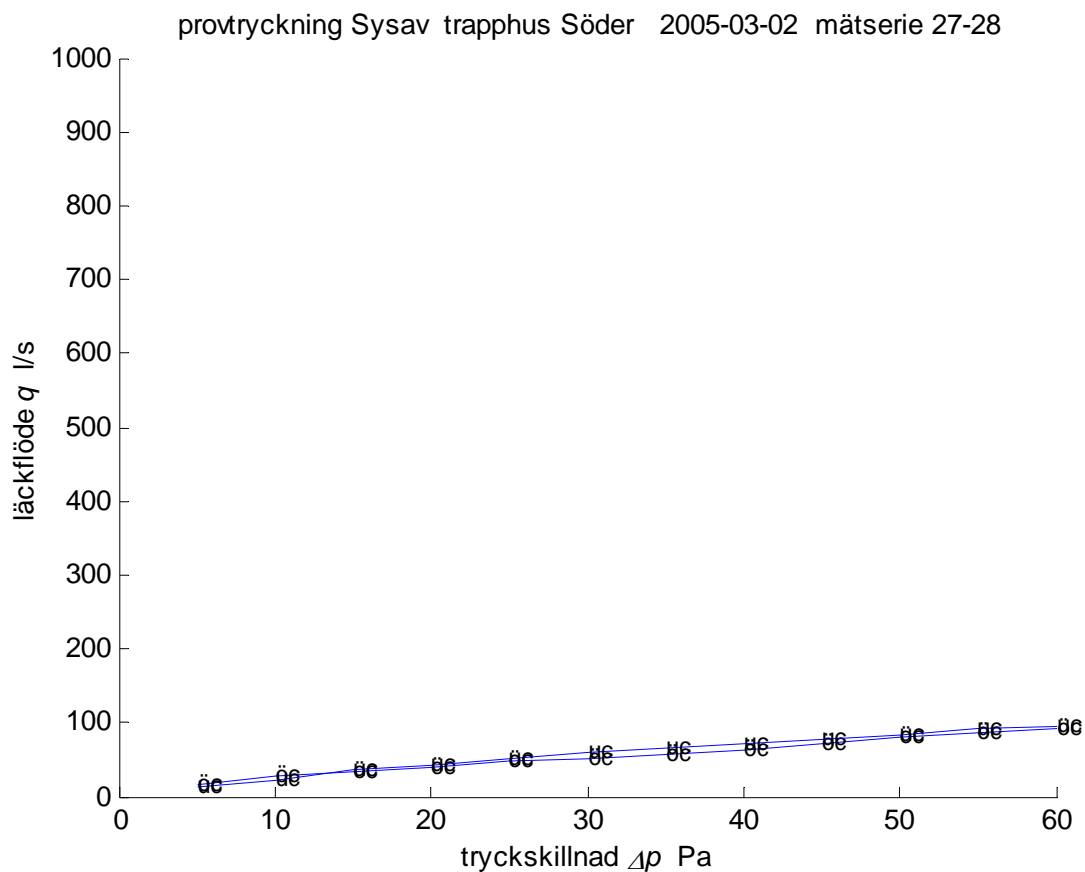
Trapphus Söder 2005-03-02 - tejpade dörrar

Syftet med denna provtryckning var att undersöka läckaget för själva trapphuset om tolv trapphusdörrar, varav tio inåtgående och två utåtgående, tejpades med silvertejp. Tejpningsen var inte helt enkel att göra förbi en dörrstängare och två större gångjärn och mellan dörrrens underkant och tröskeln.

Innan provtryckningen tätades en ventilationsöppning ut mot det fria med diametern 630 mm med ett tätningslist försett lock med diametern 750 mm. Uteluftsventilen i bottenplanet stängdes.

Båda mätserierna genomfördes med ring C. Läckflödet kunde inte läsas av direkt utan fick beräknas enligt (3.1) och avläst trycksignal.

Mätdataserie 27-28 redovisas i Figur 3.8 betecknat på samma sätt som tidigare.



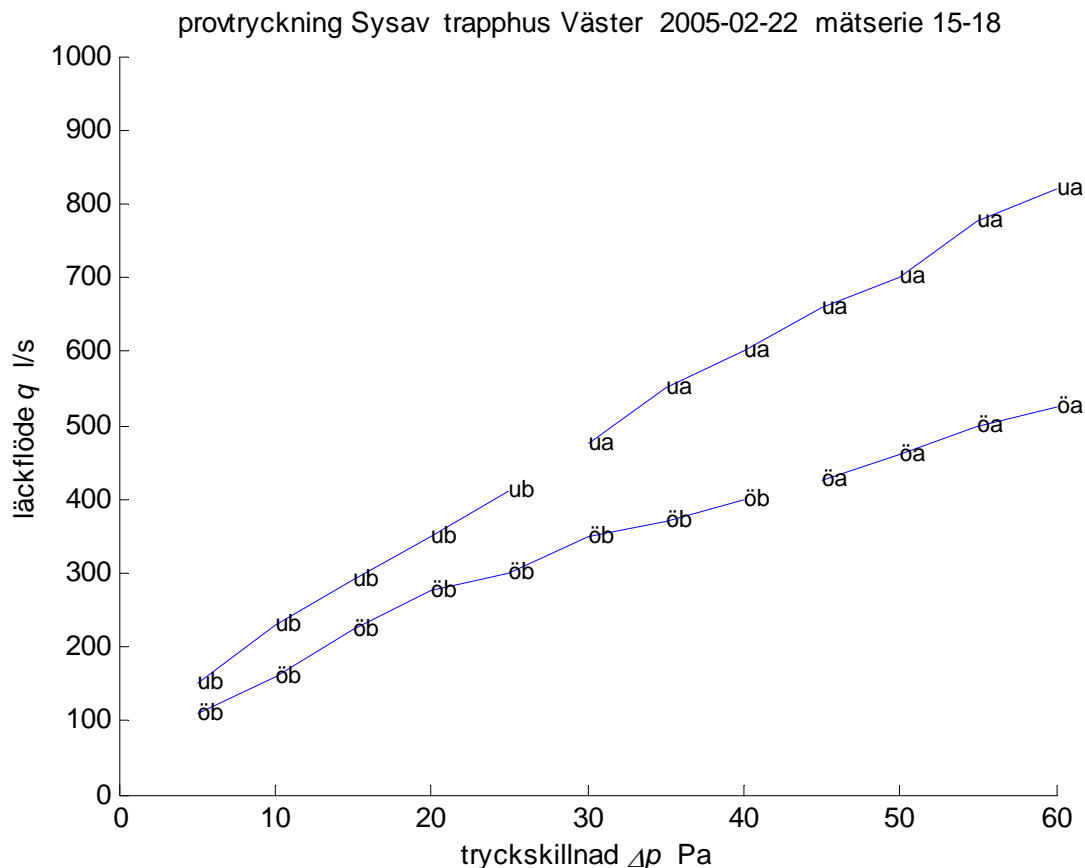
Figur 3.8 Mätdataserie 27-28 från provtryckning av trapphus Söder 2005-03-02 med tolv tejpade trapphusdörrar.

Trapphus Väster 2005-02-22

Innan provtryckningen tätades en ventilationsöppning ut mot det fria med diametern 630 mm med ett tätningslist försett lock med diametern 750 mm.

Mätdataserie 15-18 redovisas i Figur 3.9 betecknat på samma sätt som tidigare.

Antalet trycksatta dörrar var elva inåtgående. En utåtgående trapphusdörr på bottenplanet tejpad.

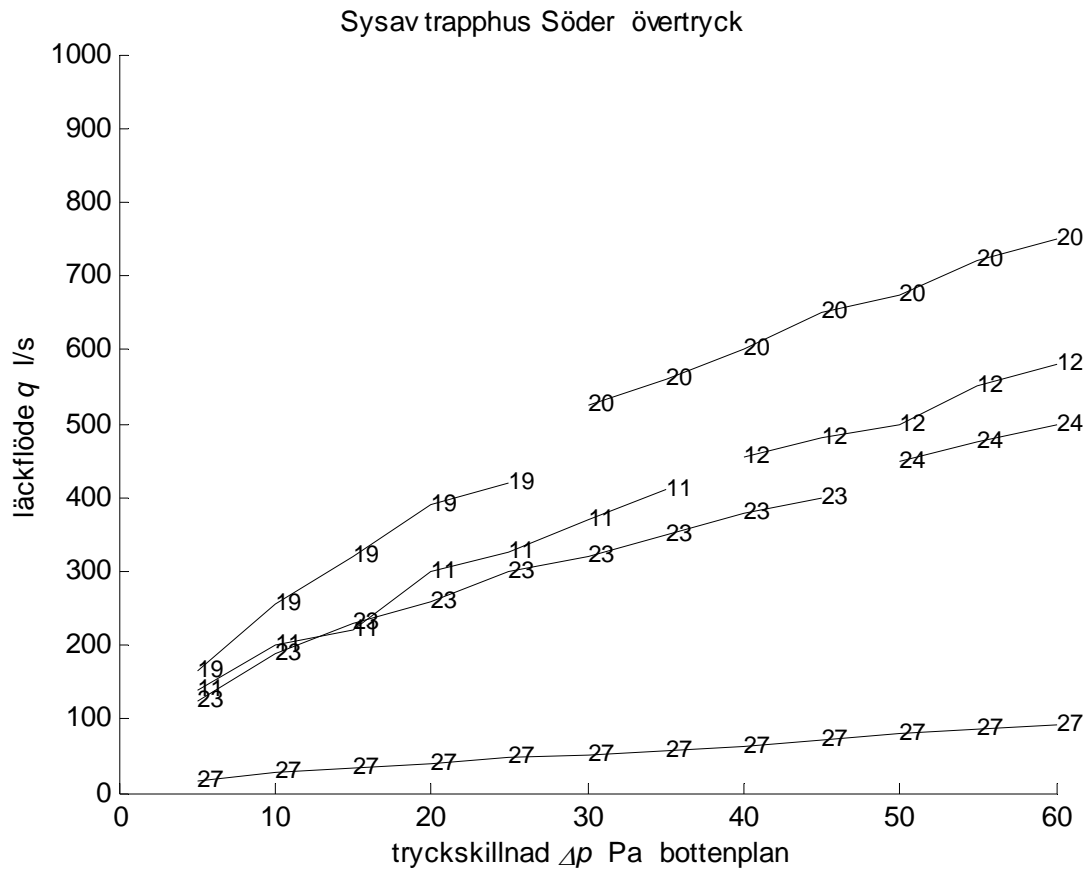


Figur 3.9 Mätdataserie 15-18 från provtryckning av trapphus Väster 2005-02-22.

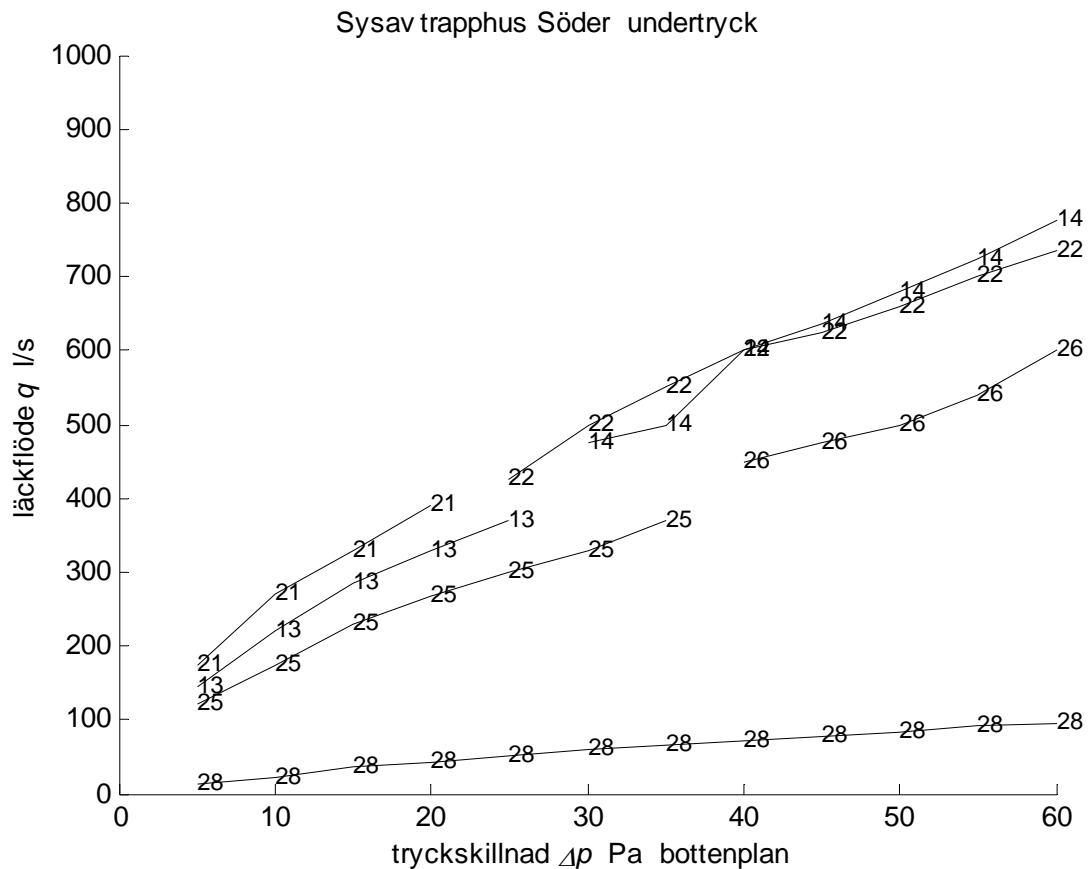
Dörrarnas inverkan på läckaget

Trapphus Söder har provtryckts och redovisats med dörrar i normalt läge i Figur 3.4-5, i utkilat läge i Figur 3.6, igendraget läge i Figur 3.7 och helt tejpat i Figur 3.8. Här görs en sammanställning av mätserierna från Figur 3.5-8 för att enkelt kunna jämföra alla fall med övertryck i Figur 3.10 och med undertryck i Figur 3.11.

Läckflödet vid övertryck i Figur 3.10 avtar som förväntat från utkilade dörrar (19-20), normala dörrar (11-12), igendragna dörrar (23-24) och tejpad dörrar (27). Resultatet för fallet med undertryck i Figur 3.11 blir snarlikt med undantag för att normalfallets läckflöde är större än för fallet med utkilade dörrar för undertryck lägre än -40 Pa. Normalfallet skiljer sig från de övriga tre fallen genom att en uteluftsventil i bottenplanet inte varit stängd.



Figur 3.10 Mätdataserier 11, 12, 19, 20, 23, 24 och 27 med övertryck för trapphus Söder.



Figur 3.11 Mätdataserier 13, 14, 21, 22, 25, 26 och 28 med undertryck för trapphus Söder.

Uppsummering av provtryckning och lufttäthet

Provtryckningen har inte alltid varit helt pålitligt. Den ena av de två differensstrycks-givarna för flödesmätning kunde ibland hänga sig. När detta upptäcktes gjordes mätserien om. Det finns exempel på konstigheter bland de redovisade mätserierna, vilka kan bero på att mätningen har delvis hängt sig utan att det upptäckts.

En enkel uppsummering av trapphusens lufttäthet görs för fallet med övertryck, vilket är det fall som är av intresse vid trycksättning av trapphus. Läckageflödet räknat per trycksatt trapphusdörr vid 60 Pa övertryck är omkring 40 l/s för normalfallet och 60 l/s för fallet med uppkilade trapphusdörrar. Övrigt läckage från själva trapphuset ingår i dessa siffror.

Läckaget för ett normalt våningsplan på 40 l/s vid 60 Pa kan jämföras med normkrav på lufttäthet. Den vertikala omslutande ytan för ett våningsplan är 50 m². Detta ger ett läckage på 0.8 l/sm² dock vid 60 Pa. Trapphusens läckage uppfyller därför precis normkravet för bostäder på 0.8 l/sm² vid 50 Pa. Normkravet för lokaler är två gånger högre alltså 1.6 l/sm² vid 50 Pa.

Trapphusdörrarnas läckage kan räknas om till en effektiv läckarea och tryckförlusterna antas vara rent kvadratiska i flödet. En tryckskillnad på 60 Pa kan räknas om till en lufthastighet på 10 m/s. Läckarean per trapphusdörr blir därför 0.004 m² eller 4000 mm² och om läckarean fördelas lika längs dörrrens omkrets på grovt 6 m fås en effektiv läckbredd på endast 2/3 mm.

Hur stor del av läckaget som utgörs av trapphusdörrarna och av själva trapphuset går inte avgöra helt säkert. Om tejpningen av trapphusdörrarna i mätserie 27-28 i Figur 3.8 antas vara helt tät fås ett trapphusläckflöde på 100 l/s vid 60 Pa och motsvarande läckarea med samma antaganden som tidigare blir 0.01 m² eller 1 dm². Denna läckarea kan räknas om till en effektiv läckbredd i hela trapphusets höjd på 33 m, vilket blir 0.0003 mm.

Detta är ett lågt värde, men visar att platsgjutna trapphus kan vara mycket täta. Möjliga läckage är en stängd men otejpad uteluftsventil, tjugo tomrör till belysningsarmaturer, anslutningar mellan dörrkarmar och trapphusväggar och även mellan provtrycknings-utrustning och dörrkarm.

4 Bestämning av lufttäthet hos trapphus

Lufttätheten i trapphus som är platsgjutna bestäms av lufttätheten hos trapphusdörrarna, som kan beskrivas med strömningstekniska modeller eller en rent numerisk modell.

Fyra strömningstekniska modeller

Sambandet mellan tryckskillnad och läckflöde kan för en trapphusdörr beskrivas med en turbulent engångsförlust vid fri utströmning i serie med en laminär friktionsförlust för en spalt. Det två tryckförlusterna kan skrivas som följer:

$$\Delta p_e = \rho v_e^2 / 2 \quad (\text{Pa}) \quad (4.1)$$

$$\Delta p_s = \lambda (l_s / 2 d_s) \rho v_s^2 / 2 \quad (\text{Pa}) \quad (4.2)$$

där

ρ	luftens densitet, kg/m ³
v_e	lufthastighet fri utströmning, m/s
v_s	lufthastighet i spalt, m/s
λ	friktionstalet, -
l_s	spalltlängd, m
d_s	spaltvidd, m

Friktionstalet λ beror på om strömningen i spalten är laminär eller turbulent. Antag att spaltvidden är 1.5 mm, hastigheten 10 m/s och den dynamiska viskositeten $15 \cdot 10^{-6}$ m²/s. Den hydrauliska diametern är dubbla spaltvidden och därmed 3 mm. Detta ger ett Reynolds tal på 2000 och för hastigheten 1 m/s fås Reynolds tal 200. En strömningshastighet på 10 m/s kan fås med en tryckskillnad på 60 Pa lika med det dynamiska trycket för samma hastighet. Slutsatsen är att strömningen är främst laminär.

Friktionstalet λ vid laminär strömning bestäms av Reynolds tal och ges av sambandet:

$$\lambda = 64 / Re \quad (-) \quad (4.3)$$

Reynolds tal definieras i sin tur som:

$$Re = v_s 2 d_s / \nu \quad (-) \quad (4.4)$$

där ν är den kinematiska viskositeten för mediet i fråga. Spaltens hydrauliska diameter är lika med dubbla spaltvidden.

Om en dörr antas ha en läckande omkrets med längden o och spaltbredden d_e kan utströmningshastigheten v_e beräknas som:

$$v_e = q / o d_e \quad (\text{m/s}) \quad (4.5)$$

Om en dörr antas ha en läckande omkrets med längden o och spaltbredden d_s kan strömningshastigheten i spalten v_s beräknas som:

$$v_s = q / o d_s \quad (\text{m/s}) \quad (4.6)$$

En naturlig förenkling är att låta de två spaltbredderna vara lika. Detta kan tolkas som en spalt avslutas med fri utströmning. Detta innebär också att medelhastigheterna måste vara lika. En anmärkning är dock att spaltströmningen och den fria utströmningen har olika hastighetsprofiler, vilket dock bortses ifrån. Det kan också tilläggas att det tar grovt femtio hydrauliska diametrar innan spaltströmningens hastighetsprofil är fullt utbildad.

Det totala tryckfallet kan fås som summan av (4.1) och (4.2) och efter eliminering av hastigheterna fås följande uttryck:

$$\Delta p = a q + b q^2 \quad (\text{Pa}) \quad (4.7)$$

där konstanterna a och b ges av:

$$a = 8 \nu l_s \rho / o d_s^3 \quad (\text{Pa}/(\text{m}^3/\text{s})) \quad (4.8)$$

$$b = \rho / 2 o^2 d_e^2 \quad (\text{Pa}/(\text{m}^3/\text{s})^2) \quad (4.9)$$

Parametrarna a och b kan bestämmas med mätdata och sambandet (4.7) och därefter kan spaltvidderna d_s och d_e bestämmas med (4.8) och (4.9) om omkretsen o och spaltlängden l_s är givna. Densiteten ρ och den kinematiska viskositeten ν är 1.2 kg/m^3 respektive $0.000015 \text{ m}^2/\text{s}$.

Det är också möjligt att med samma modellparametrar a och b låta de två spaltvidderna vara lika och räkna fram en spaltlängd l_s . Det går också att fixera spaltlängden l_s och anpassa endast en parameter, en gemensam spaltvidd. Dessa två modeller med två respektive en parameter har beräknats och som jämförelse även kompletterats med en rent linjär modell med en parameter a och en rent kvadratisk modell med en parameter b . De fyra modellerna sammanställs nedan.

$$\Delta p(a, q) = a q \quad \text{modell 1} \quad (\text{Pa}) \quad (4.10)$$

$$\Delta p(b, q) = b q^2 \quad \text{modell 2} \quad (\text{Pa}) \quad (4.11)$$

$$\Delta p(a, b, q) = a q + b q^2 \quad \text{modell 3} \quad (\text{Pa}) \quad (4.12)$$

$$\Delta p(d, q) = a' q/d^3 + b' q^2/d^2 \quad \text{modell 4} \quad (\text{Pa}) \quad (4.13)$$

där parametererna a' och b' ges av (4.8) och (4.9) på formen:

$$a' = 8 \nu l_s \rho / o \quad (\text{Pas}) \quad (4.14)$$

$$b' = \rho / 2 o^2 \quad (\text{Pa}/(\text{m}^2/\text{s})^2) \quad (4.15)$$

Hur bra anpassningen blir för dessa modeller redovisas genom att beräkna en omskalad korrelationskoefficienten mellan mätt och beräknad tryckskillnad, vilket redovisas i Tabell 4.1 nedan. Siffrorna visar att korrelationen är mycket hög, vilket kommer att utredas nedan. Bäst är den för modell 3 med två parametrar.

Korrelationskoefficienten för två godtyckliga funktioner på formen $f_a(x)=x^a$ och $f_b(x)=x^b$ kan beräknas till följande samband:

$$c(a,b) = (2a+1)^{0.5}(2b+1)^{0.5}/(a+b+1) \quad (-) \quad (4.16)$$

Uttrycket (4.16) visar att korrelationen mellan en rent linjär funktion $a=1$ och en rent kvadratisk funktion $b=2$ blir hög lika med $(15/16)^{0.5}$ eller 0.968 trots att de två funktionerna skiljer sig åt. Detta innebär att om verkligheten är en summa av en linjär och en kvadratisk funktion kommer korrelationen att bli hög både för en rent linjär eller rent kvadratisk modell. Korrelationskoefficienten skalas därför om till intervallet $((15/16)^{0.5}, 1)$ i Tabell 4.1 där 0 står för korrelationen $(15/16)^{0.5}$ och 1 för korrelationen 1.

Tabell 4.1 Omskalad korrelationskoefficient

fall	trapphus	mätserier	tryck	mät- data	modell 1 (4.10)	modell 2 (4.11)	modell 3 (4.12)	modell 4 (4.13-15)
1	Mitt	1-2	över	13	0.719	0.824	0.868	0.889
2	Mitt	3	under	6	0.941	0.727	0.920	0.943
3	Mitt	29-30	över	12	0.772	0.712	0.867	0.887
4	Mitt	31-32	under	6	0.948	0.516	0.913	0.881
5	Mitt	33-34	över	12	0.784	0.840	0.898	0.930
6	Mitt	35-36	under	6	0.770	-0.335	0.629	0.434
7	Söder	5-8	över	24	0.790	0.361	0.785	0.692
8	Söder	9-10	under	13	0.823	0.563	0.813	0.803
9	Söder	11-12	över	12	0.829	0.821	0.909	0.934
10	Söder	13-14	under	12	0.884	0.631	0.884	0.835
11	Söder	19-20	över	12	0.644	0.911	0.929	0.919
12	Söder	21-22	under	12	0.692	0.941	0.959	0.951
13	Söder	23-24	över	12	0.826	0.765	0.849	0.913
14	Söder	25-26	under	12	0.895	0.427	0.787	0.773
15	Söder	27-28	över	24	0.694	0.364	0.696	0.713
16	Väster	15-16	över	12	0.713	0.865	0.932	0.928
17	Väster	17-18	under	12	0.965	0.625	0.940	0.862

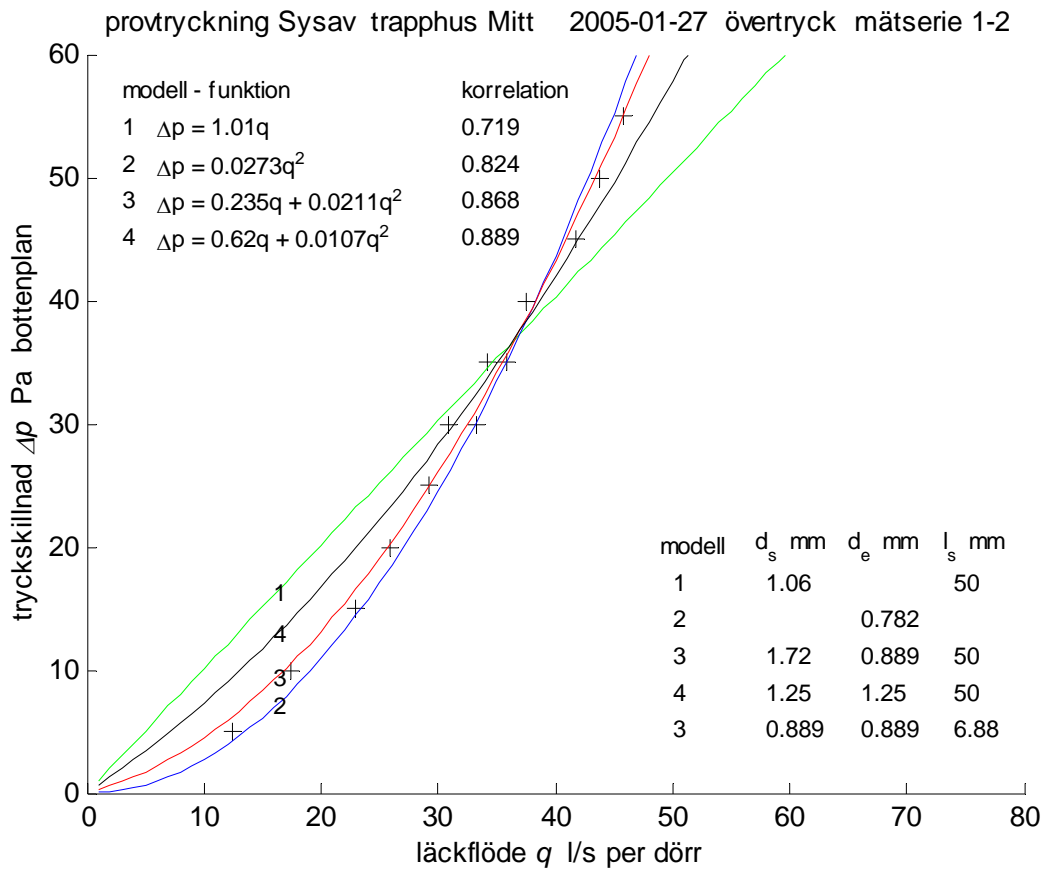
De två spaltvidderna d_e och d_s har bestämts med mätdata under förutsättningen att omkretsen o är 6 m och spaltlängden l_s är 50 mm. Resultatet redovisas i Tabell 4.2 nedan för de fyra modellerna enligt (4.10-15).

Tabell 4.2 Bestämning av spaltvidderna d_s och d_e med mätdata och modellerna 1-4.

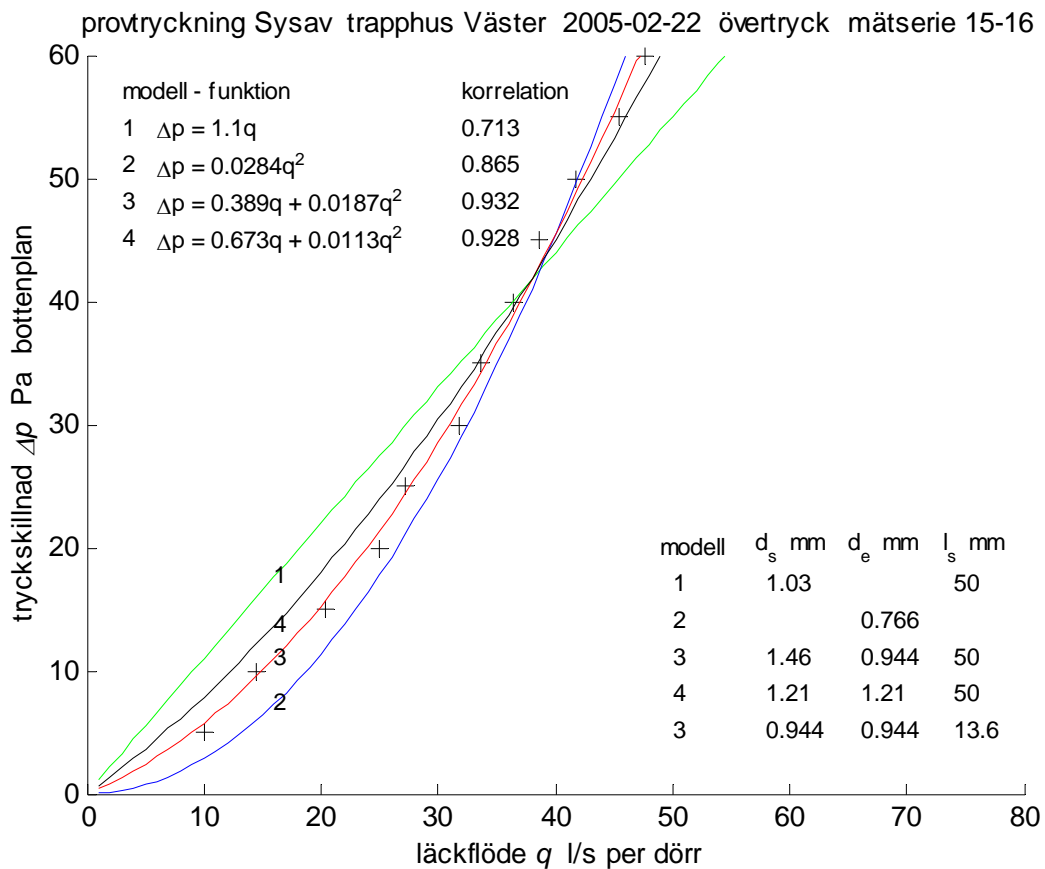
fall	Figur	modell 1 (4.10) d_s mm	modell 2 (4.11) d_e mm	modell 3 (4.12) d_s mm	modell 3 (4.12) d_e mm	modell 3 ₁ (4.12) l_s mm	modell 4 (4.13-15) d mm
1	4.1	1.06	0.782	1.72	0.89	6.88	1.25
2		1.14	0.765	1.38	1.15	29.00	1.30
3		1.01	0.740	1.30	1.00	22.80	1.19
4		1.09	0.691	1.18	1.47	95.80	1.23
5		1.04	0.779	1.63	0.90	8.50	1.23
6		1.08	0.680	1.13	1.84	215.00	1.22
7		1.04	0.784	1.08	2.23	439.00	1.23
8		1.16	1.050	1.44	1.50	57.10	1.46
9		1.06	0.845	1.49	1.05	17.80	1.28
10		1.16	1.120	1.36	1.77	112.00	1.50
11	4.3	1.17	1.120	1.75	1.33	22.00	1.51
12		1.16	1.100	1.91	1.24	13.80	1.49
13	4.4	1.02	0.731	1.56	0.85	8.19	1.19
14		1.05	0.840	1.25	1.31	58.00	1.27
15		0.5710	0.135	0.66	0.22	1.84	0.58
16	4.2	1.03	0.766	1.46	0.94	13.60	1.21
17		1.17	1.170	1.37	1.90	133.00	1.54

₁ $d_s = d_e$

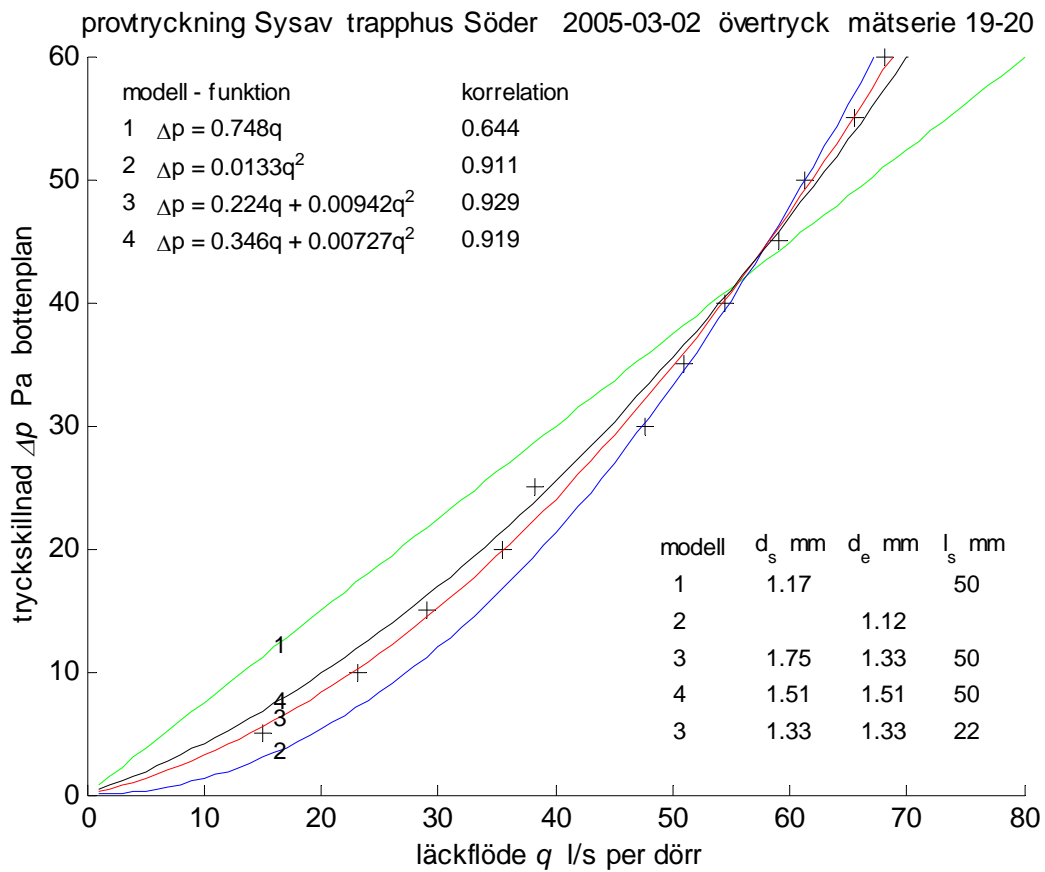
Hur väl modellerna beskriver mätdata redovisas också i Figur 4.1-4 för de fyra provtryckningarna med övertryck för trapphus Mitt 05-01-27, Väster 05-02-22, Söder med utkilade dörrar 05-03-02 och Söder med igendragna dörrar 05-03-02. Den i figurerna angivna korrelationen är inte den omskalade utan den ursprungliga. Antalet trycksatta dörrar är för de fyra redovisade fallen tolv för trapphus Mitt och elva för de övriga.



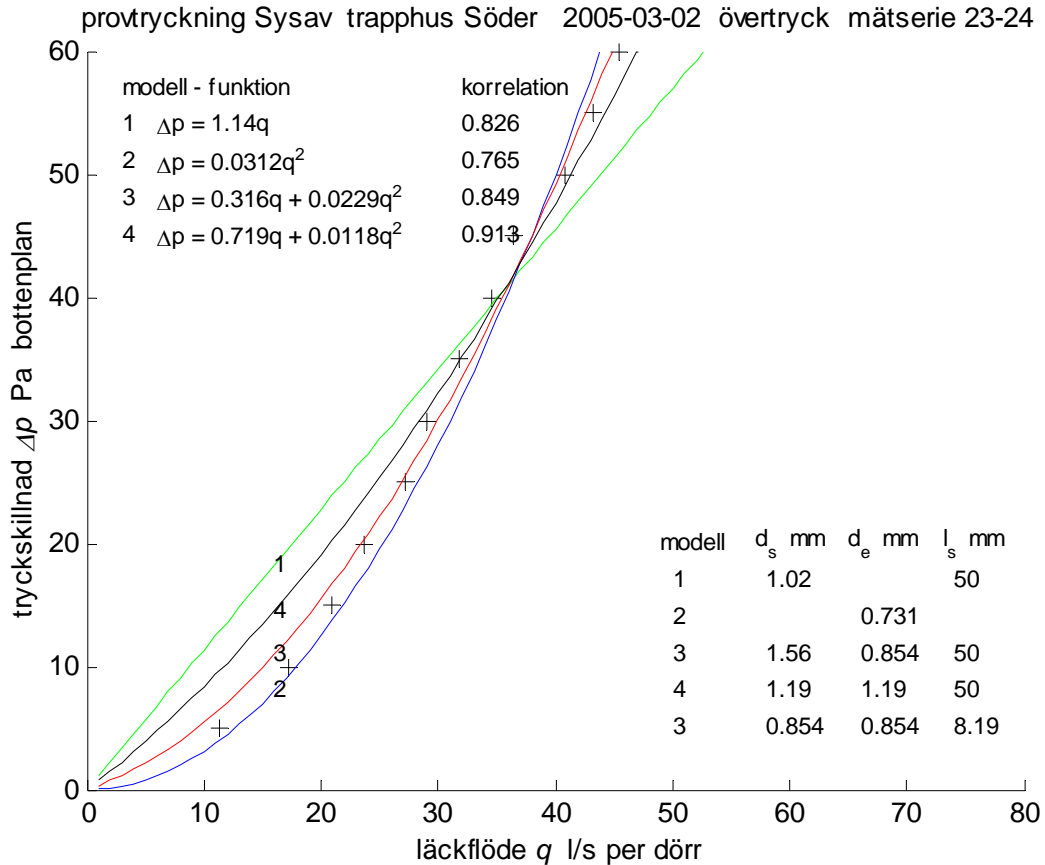
Figur 4.1 Modeller 1-4 och mätdata för övertryck och trapphus Mitt 05-01-27.



Figur 4.2 Modeller 1-4 och mätdata för övertryck och trapphus Väster 05-02-22.



Figur 4.3 Modeller 1-4 och mätdata för övertryck, uppkilade dörrar och trapphus Söder.



Figur 4.4 Modeller 1-4 och mätdata för övertryck, igendragna dörrar och trapphus Söder.

En numerisk modell

En alternativ modell till de linjära och kvadratiska modeller 1-4, vilka ges av (4.10-15), är följande modell betecknad som nummer 5:

$$\Delta p = a q^b \quad \text{modell 5} \quad (\text{Pa}) \quad (4.17)$$

där a och b är konstanter. Exponenten b bör ligga i intervallet (1,2). De två modellparametrarna a och b och korrelationskoefficienten redovisas i Tabell 4.3 för samma fall som i Tabell 4.1-2. Siffrorna i Tabell 4.3 visar att flödesexponenten går från 1.14 till 1.84. fem av fallen har en flödesexponent mindre än 1.5. Medelvärde för de sjutton redovisade fallen är 1.55.

Korrelationskoefficienten är den samma som för modell 3 också med två parametrar

Tabell 4.3 Parametrarna a och b och korrelationen för modell 5 enligt (4.17)

fall	trapphus	mätserier	tryck	mätdata	$a_{(4.17)}$	$b_{(4.17)}$	original	omskalad
1	Mitt	1-2	över	13	0.051	1.83	0.996	0.870
2	Mitt	3	under	6	0.182	1.45	0.998	0.937
3	Mitt	29-30	över	12	0.193	1.50	0.996	0.889
4	Mitt	31-32	under	6	0.421	1.25	0.997	0.916
5	Mitt	33-34	över	12	0.060	1.79	0.997	0.905
6	Mitt	35-36	under	6	0.317	1.35	0.983	0.468
7	Söder	5-8	över	24	0.664	1.14	0.993	0.784
8	Söder	9-10	under	13	0.101	1.52	0.995	0.835
9	Söder	11-12	över	12	0.078	1.69	0.997	0.914
10	Söder	13-14	under	12	0.137	1.44	0.996	0.882
11	Söder	19-20	över	12	0.063	1.62	0.997	0.912
12	Söder	21-22	under	12	0.041	1.73	0.999	0.957
13	Söder	23-24	över	12	0.058	1.84	0.995	0.839
14	Söder	25-26	under	12	0.141	1.54	0.992	0.761
15	Söder	27-28	över	24	3.170	1.38	0.991	0.715
16	Väster	15-16	över	12	0.133	1.58	0.998	0.943
17	Väster	17-18	under	12	0.130	1.43	0.998	0.942

Felkälla vid provtryckning av höga byggnader

Provtryckning görs under förutsättning att tryckskillnaden är densamma över alla läckor. Detta innebär att provtryckning av byggnader bör ske med så liten vindpåverkan och termisk påverkan som möjligt. En temperaturskillnad mellan inne och ute skapar en tryckskillnad som varierar med höjden. Provtryckning av höga byggnader kan i ett sådant fall bli missvisande eftersom tryckskillnaden inte är densamma över alla läckor. Det kan vara både övertryck och undertryck över läckorna beroende på höjden.

I det aktuella fallet ligger trapphusen helt eller till största delen inuti byggnaden, men temperaturen i trapphuset och i byggnaden i övrigt behöver inte vara lika. Hur mycket en temperaturskillnad och därmed en med höjden varierande tryckskillnad påverkar provtryckningsresultatet skall undersökas med en enkel normerad modell. Modellen antas ha en i höjddled jämnt fördelad läcka. Flödet q kan vid konstant tryckskillnad Δp skrivas som

$$q = \Delta p^{0.5} \quad (-) \quad (4.18)$$

Antag att provtryckningen sker nederst med tryckskillnaden Δp och antag vidare att en konstant temperaturskillnad skapar en tryckskillnad över hela byggnads- och läckhöjden Δp_t . Den varierande tryckskillnaden $\Delta p(z)$ kan skrivas som en funktion av den normerade höjden z med $z = 0$ för nederst och $z = 1$ för överst:

$$\Delta p(z) = \Delta p + \Delta p_t z \quad (-) \quad (4.19)$$

Det resulterande läckflödet kan beräknas genom integration av (4.18) med (4.19) över intervallet (0,1) och för övertryck i hela byggnaden $\Delta p > 0$ fås:

$$q = 2((\Delta p + \Delta p_t)^{1.5} - \Delta p^{1.5})/3\Delta p_t \quad \Delta p > -\Delta p_t \quad (-) \quad (4.20)$$

För övertryck nederst $\Delta p > 0$ och undertryck överst $\Delta p < -\Delta p_t$ fås utflödet q_p , inflödet q_n och trycksättningsflödet q som:

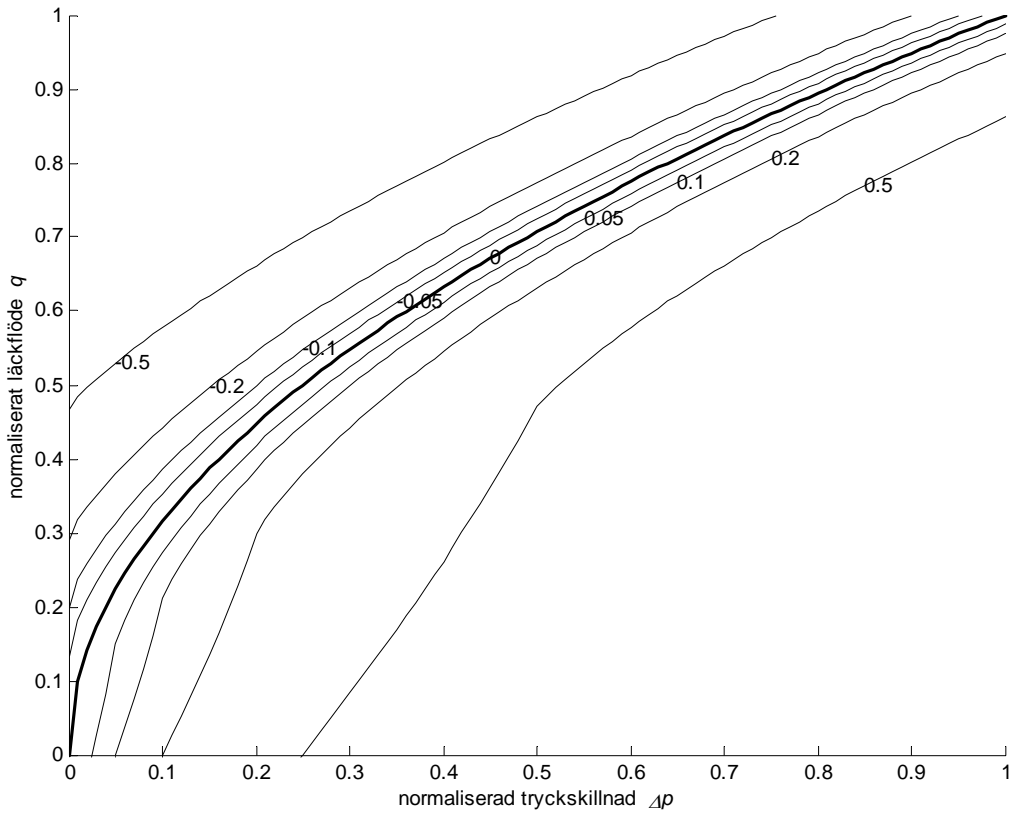
$$q_p = -2 \Delta p^{1.5}/3\Delta p_t \quad \Delta p < -\Delta p_t \quad (-) \quad (4.21)$$

$$q_n = -2(-\Delta p_t - \Delta p)^{1.5}/3\Delta p_t \quad \Delta p < -\Delta p_t \quad (-) \quad (4.22)$$

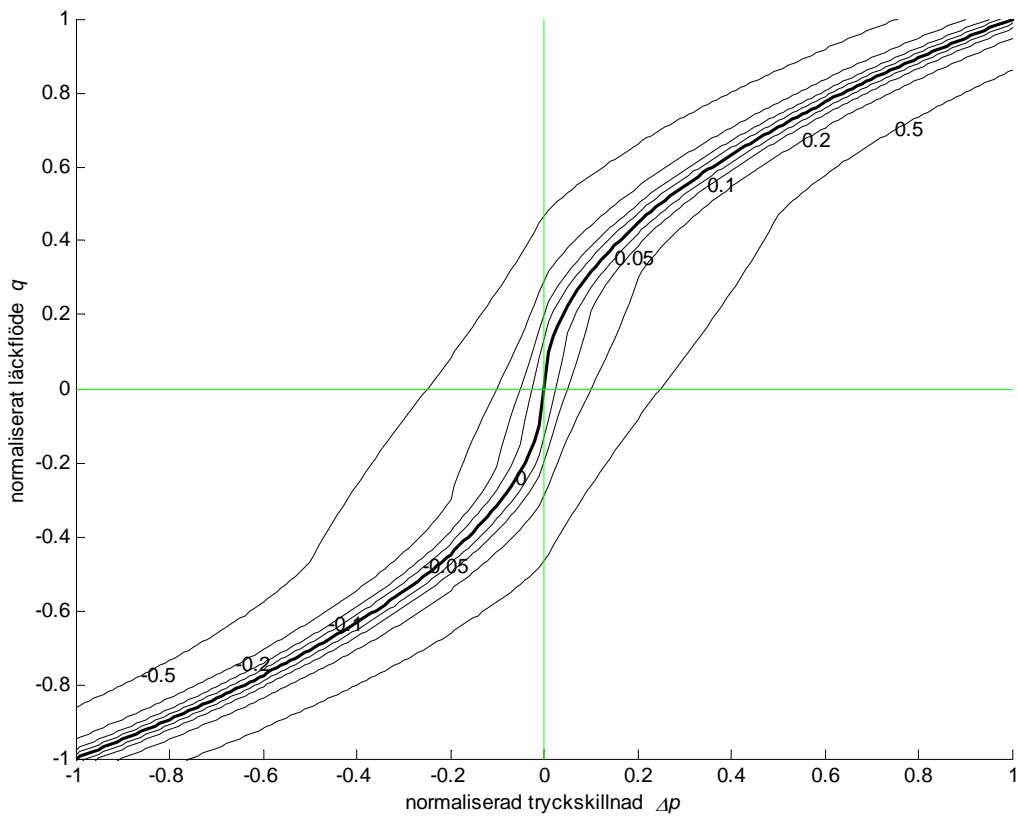
$$q = q_p - q_n \quad (-) \quad (4.23)$$

Ovanstående uttryck (4.21-23) gäller även för fallet med enbart undertryck och undertryck nederst och övertryck överst på grund av symmetri och med beaktande av tecken. Notera att när $\Delta p_t = -2\Delta p$ blir $q_p = q_n$ och provtryckningsflödet q lika med noll.

Hur provtryckningsflödet varierar med tryckskillnaden nederst redovisas i Figur 4.5 och 4.6 för modellen (4.21-23), olika värden på den termiska tryckskillnaden $\Delta p_t = (-0.5, -0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.5)$ och provtryckningsintervallet $\Delta p = (0, 1)$ respektive $\Delta p = (-1, 1)$.



Figur 4.5 Provflöde q som funktion av provtryck Δp enligt (4.21-23) och olika Δp_i .



Figur 4.6 Provflöde q som funktion av provtryck Δp enligt (4.21-23) och olika Δp_i .

Hur mycket det antagna sambandet mellan flöde q och tryckskillnad Δp påverkas av den termiska tryckskillnaden kan undersökas genom att anpassa en kvadratisk modell enligt (4.18) $q = a_{0.5}\Delta p^{0.5}$ och en mera allmän modell på formen $q = a\Delta p^b$. Anpassning har skett med enbart övertryck och med både under- och övertryck. Antalet data har varit 10 respektive 20 i de två fallen. Fall med orimliga värden har slopats, vilket är negativa flöden vid övertryck och omvänt. Valda provtryck har varit (0.1(0.1)1.0) respektive -(0.1(0.1)1.0) och (0.1(0.1)1.0). Resultatet redovisas i Tabell 4.4 respektive 4.5.

Tabell 4.4 Modellanpassning med enbart övertryck

Δp_t	$a_{0.5}$	a	b	$std(e_{0.5})$ / $std(q)$	$std(e)$ / $std(q)$	$std(q)$
-0.5000	1.1941	1.0796	0.2929	0.4987	0.1258	0.1790
-0.2000	1.0842	1.0236	0.3812	0.2147	0.0746	0.2004
-0.1000	1.0436	1.0086	0.4293	0.1118	0.0453	0.2106
-0.0500	1.0222	1.0030	0.4607	0.0574	0.0256	0.2168
-0.0200	1.0090	1.0008	0.4831	0.0234	0.0112	0.2210
-0.0100	1.0045	1.0003	0.4913	0.0118	0.0058	0.2225
0.0000	1.0000	1.0000	0.5000	0.0000	0.0000	0.2240
0.0100	0.9954	0.9999	0.5092	0.0120	0.0062	0.2257
0.0200	0.9908	1.0000	0.5190	0.0242	0.0128	0.2274
0.0500	0.9766	1.0020	0.5530	0.0626	0.0365	0.2330
0.1000	0.9514	1.0193	0.6423	0.1400	0.1053	0.2461

Tabell 4.5 Modellanpassning med både övertryck och undertryck

Δp_t	$a_{0.5}$	a	b	$std(e_{0.5})$ / $std(q)$	$std(e)$ / $std(q)$	$std(q)$
-0.1000	0.9975	1.0139	0.5358	0.2031	0.2058	0.2268
-0.0500	0.9994	1.0025	0.5069	0.1006	0.1008	0.2200
-0.0200	0.9999	1.0004	0.5010	0.0403	0.0403	0.2184
-0.0100	1.0000	1.0001	0.5003	0.0201	0.0201	0.2181
0.0000	1.0000	1.0000	0.5000	0.0000	0.0000	0.2181
0.0100	1.0000	1.0001	0.5003	0.0201	0.0201	0.2181
0.0200	0.9999	1.0004	0.5010	0.0403	0.0403	0.2184
0.0500	0.9994	1.0025	0.5069	0.1006	0.1008	0.2200
0.1000	0.9975	1.0139	0.5358	0.2031	0.2058	0.2268

Provflödet i Figur 4.5 och 4.6 avviker något från det ideala sambandet (4.18) med ökande termisk tryckskillnad Δp_t . Värdet $\Delta p_t = 0.1$ kan tolkas som 6 Pa termisk tryckskillnad om största provtryck är 60 Pa. Fallet med både över- och undertryck ger en nästan försumbar avvikelse från rätt värden på parametrarna a och b . Felet blir något större när endast över- eller undertrycksdata används för modellanpassningen.

5 Provflödning av trapphus

Syftet med provflödning är att få utförliga mätningar av tryckfall, flöde och temperaturer för att kunna bestämma engångstryckfall per våningsplan eller per meter och värmeöverföringsförmåga per meter. Själva mätningarna redovisas i detta avsnitt och bestämningar av tryckfall och värmeöverföringsförmåga i nästa avsnitt.

Trapphus Mitt 2005-01-27 - förförsök

Några enkla och korta mätningar under vardera 60 s med provflödning genomfördes för att testa om den naturliga självdragsströmningen kunde ge tillräckligt flöde och tryckfall genom att endast öppna en dörr nederst i trapphuset och en inspektionslucka överst i trapphuset.

Tryckfallet mättes manuellt med en U-rörsmanometer mellan plan 11 och 24 med en mätsträcka på 39 m. Flödet bestämdes genom traversering av lufthastigheten över en dörröppningen med en vinghjulsanemometer.

Tre korta manuella mätningar genomfördes med resultatet en tryckskillnad i medeltal på 15, 12.5 och 10 Pa och en medelhastighet på 2, 1.5 respektive 1.5 m/s.

Trapphus Mitt 2005-03-09 - huvudförsök

Mätningarna genomfördes med tre datainsamlade utrustningar enligt sammanställningen i Tabell 5.1. Mätningen av tryckfallet i själva trapphuset skedde mellan två mätpunkter placerade på nivån 6 m och 45 m, vilket ger en mätsträcka i trapphuset på 39 m. Mätpunkterna bestod av porösa mineralullskuber med sidan 100 mm och placerades i mittpunkten på viloplanen för de angivna höjderna. En viktig förutsättning för rätt tryckfallsmätning är att lufttemperaturen i trapphuset och mätslangen mellan de två mätpunkterna är lika.

En normal provtryckningen genomfördes först för att kontrollera trapphusets täthet efter åtgärd och redovisades i avsnitt 3 och 4 och därefter användes provtryckningsutrustningen för att skapa ett största möjliga flöde. Detta uppmättes till $2.7 \text{ m}^3/\text{s}$ och tryckfallet över mätsträckan på 39 m blev 8 Pa. Detta gjordes för att kunna kalibrera flödesmätningen i dörröppningen.

Luftflödet upp genom trapphuset beräknades med en mätt lufthastighet för en givare placerad mitt i dörröppningen i kant med trapphusets innervägg. Notera att mätningen sker i själva öppningen och inte i någon vena contracta. Kontraktion har satts till 0.9 för den valda mätpunkten med hjälp av kalibreringsförsöket nämnt ovan.

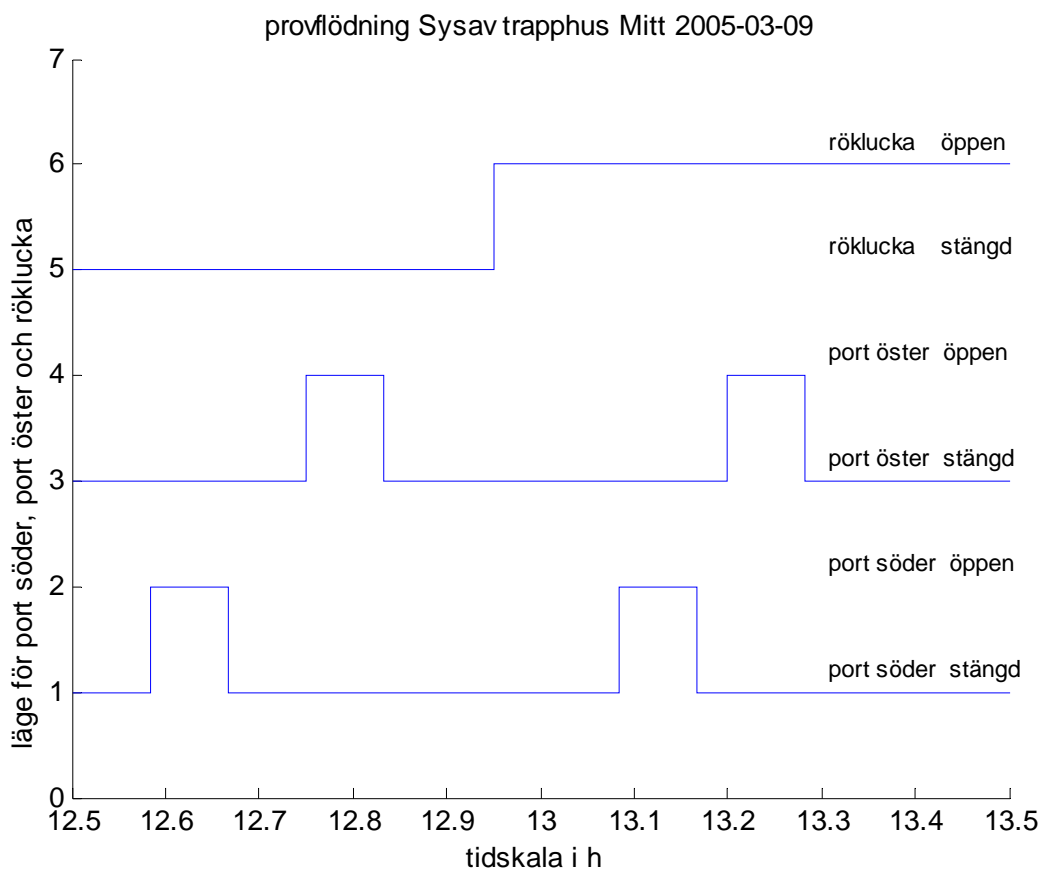
Den naturliga strömningen genom trapphuset startades genom att öppna en dörr nederst, i vilken lufthastigheten mättes, och en inspektionslucka överst i trapphuset. En röklucka öppnades efter halva mättiden. Två portar, en nära i öster och en långt ifrån i söder, öppnades under fem minuter och stängdes därefter för att påverka lufttemperaturen i trapphuset och även tryckförhållanden genom att påverka neutrallagret i byggnaden. Fri öppningsarea för dörr, inspektionslucka och röklucka var 1.8, 0.8 respektive 0.9 m^2 .

Hur portar och röklucka manövrerades redovisas i Figur 5.1. Alla mätvärden har räknats om till medelvärden för 30 s och redovisas i Figur 5.2-5 för temperatur, tryckfall, lufthastighet respektive beräknat luftflöde.

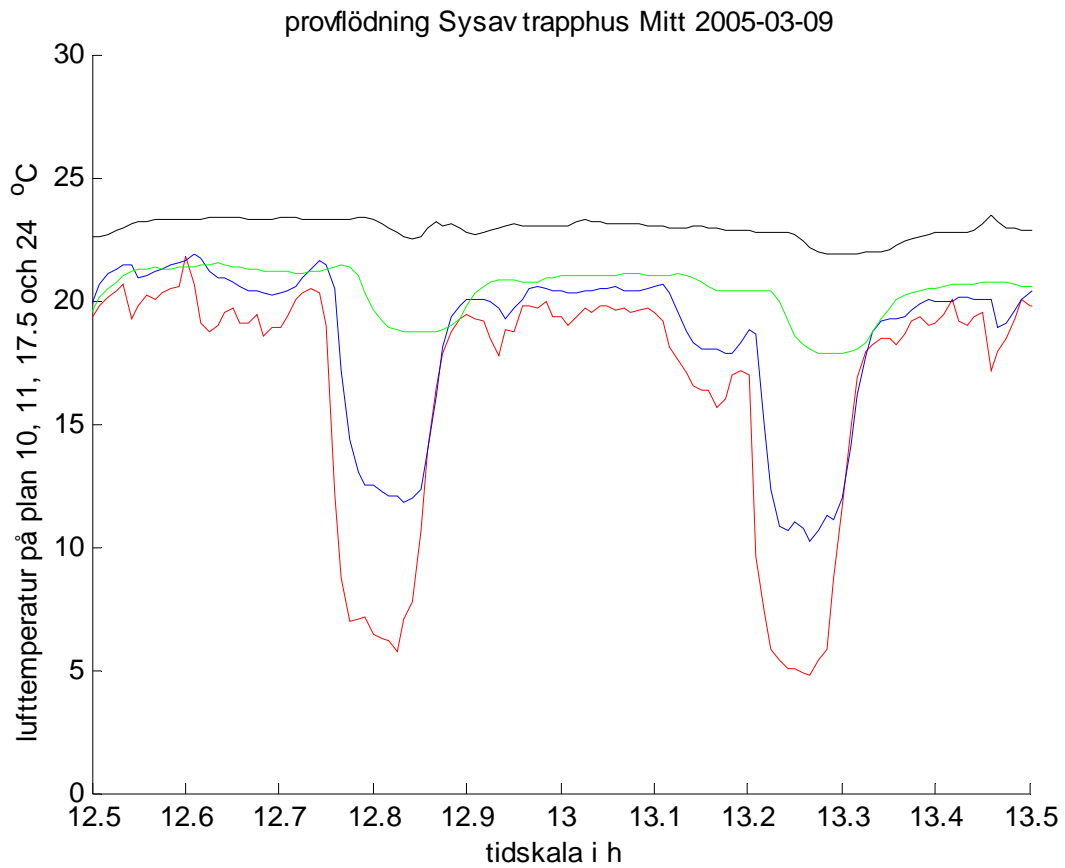
Tabell 5.1 Mätpunkter vid provflödning 2005-03-09 av trapphus Mitt

givare	placering våningsplan	placering plushöjd m	mätssystem	mätintervall s	Figur
GT10	10	3.0	Swema Air 300	0.1	5.2
GT11	11	6.0	Mitec AT41	10	5.2
GT17.5	17.5	25.5	Mitec AT31	30	5.2
GT24	24	45.0	Mitec AT31	30	5.2
GP11-24	11-24	3.0/45.0	Mitec AT41	10	5.3
GV10	10	3.0	Swema Air 300	0.1	5.4

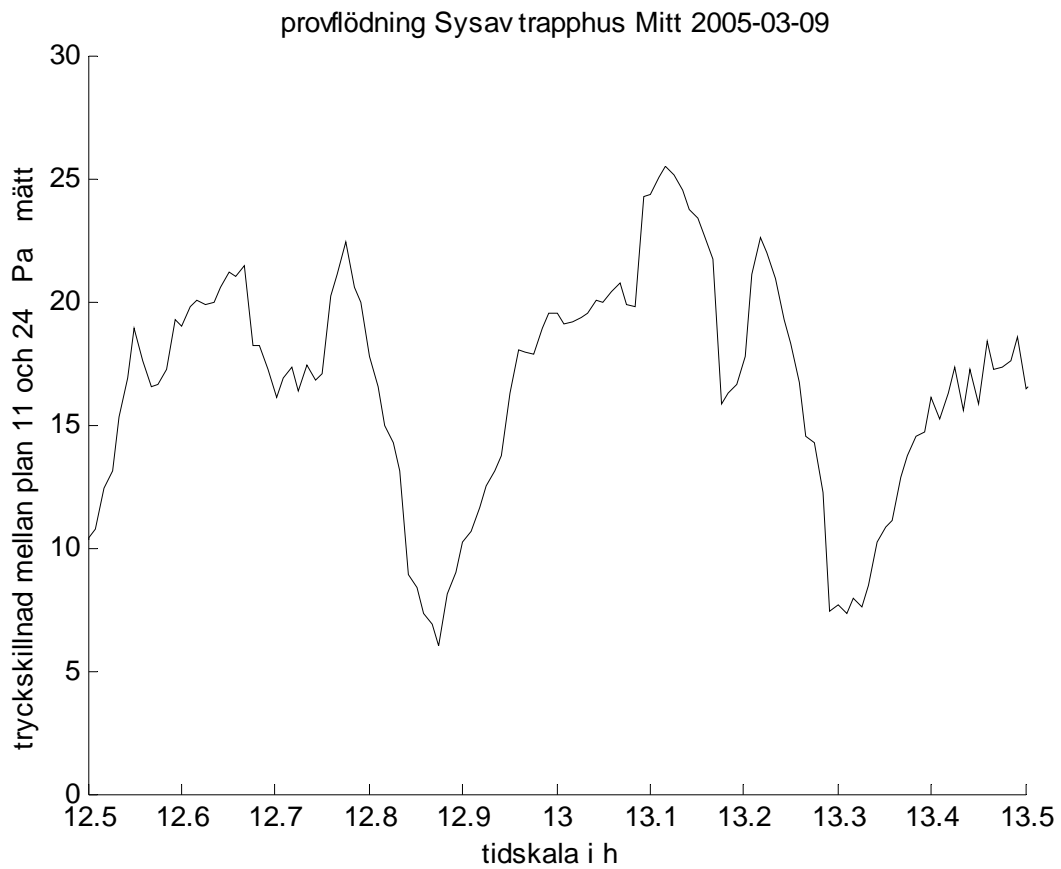
En enkel jämförelse av åtgärder och mätvärden i Figur 5.1-4 visar att öppningen av rökluckan inte ökar genomströmningen märkbart. Öppning av den östra porten nära trapphuset innebär en minskning av temperatur, tryckfall och lufthastighet. Den södra porten ger endast en marginell temperaturminskning, men en mindre ökning av tryckfall och lufthastighet.



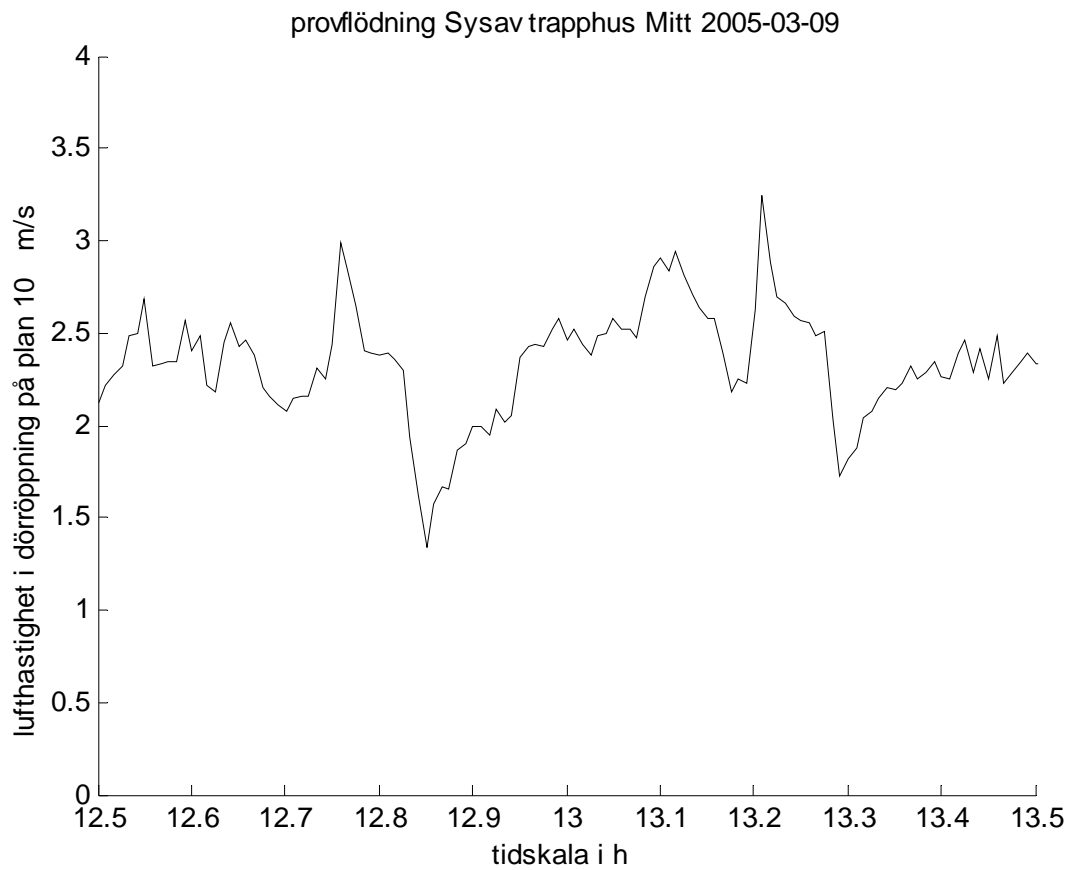
Figur 5.1 Läge för röklucka, port öster och port söder vid provflödning av trapphus Mitt.



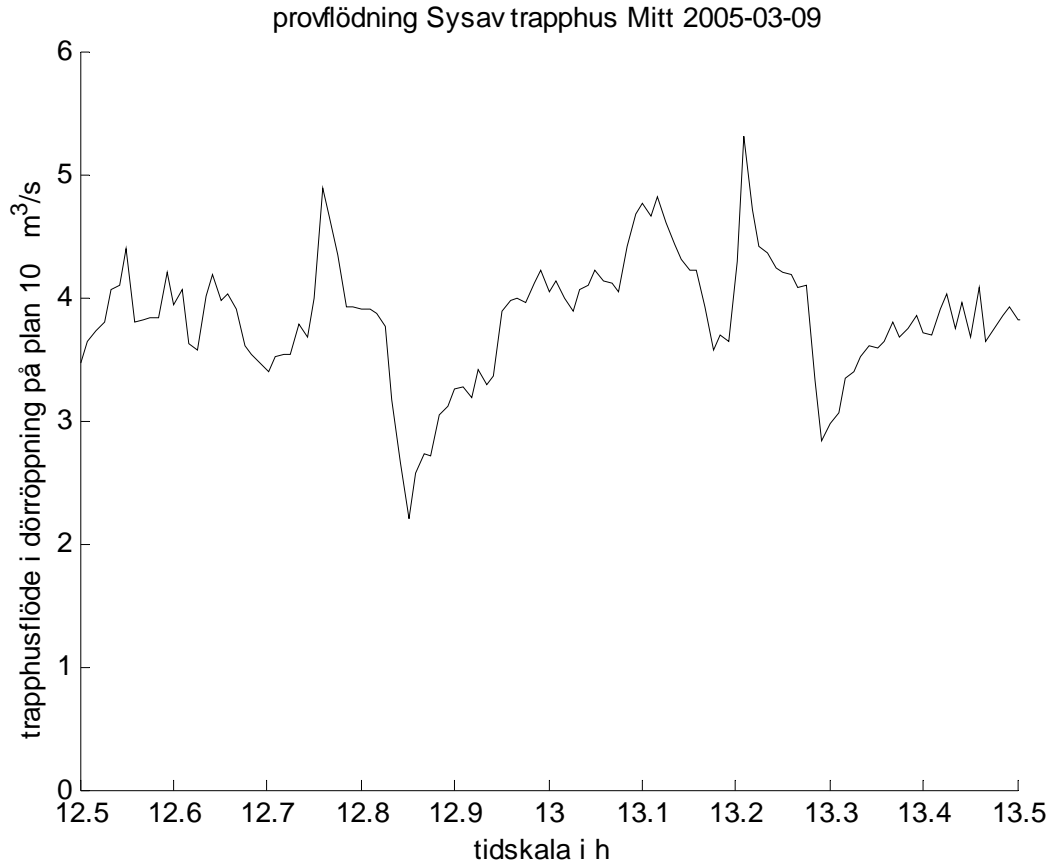
Figur 5.2 Trapphustemperatur på plan 10, 11, 17.5 och 24 vid provflödning av trapphus Mitt.



Figur 5.3 Trapphustryckfall mellan plan 11 och 24 vid provflödning av trapphus Mitt.



Figur 5.4 Lufthastighet i dörröppning på plan 10 vid provflödning av trapphus Mitt.



Figur 5.5 Beräknat trapphusflöde vid provflödning av trapphus Mitt.

6 Bestämning av tryckfall i trapphus

Tryckfall i trapphus kan för en given mätsträcka skrivas som följer:

$$\Delta p = e_t \rho_t v_t^2 / 2 \quad (\text{Pa}) \quad (6.1)$$

där

Δp	tryckfall, Pa
e_t	total engångsförlust, -
ρ_t	trapphusluftens densitet, kg/m ³
v_t	trapphusluftens karakteristiska hastighet, m/s

Den totala engångsförlusten e_t kan i sin tur skrivas som:

$$e_t = z e_z = n e_n \quad (-) \quad (6.2)$$

där

z	nivåskillnad, m
e_z	engångsförlust per m, m ⁻¹
n	antal våningsplan, -
e_n	engångsförlust per våningsplan, -

Den karakteristiska trapphushastigheten v_t kan beräknas med hjälp av beräknat massflöde och därefter omräknat till volymflöde med korrigering för temperaturberoende densitet. Massflödet beräknas för inloppsöppningen med hastighet, temperatur och den effektiva arean. Detta ger sammantaget följande samband:

$$v_t = C_i A_i \rho_i v_i / \rho_t A_t \quad (\text{m/s}) \quad (6.3)$$

där

C_i	kontraktionsfaktor för dörröppning, -
A_i	area för dörröppning, m ²
ρ_i	luftens densitet i dörröppning, kg/m ³
v_i	luftens hastighet i dörröppning, m/s
A_t	karakteristisk area för trapphus, m ²

Tryckfallet enligt (6.1) kan nu skrivas som en funktion av mätt inloppshastighet och beräknad densitet som följer:

$$\Delta p = e_t (C_i A_i / A_t)^2 (\rho_i^2 / \rho_t) v_i^2 / 2 \quad (\text{Pa}) \quad (6.4)$$

De två parenteserna i (6.4) är omräkningsfaktorer för olika areor och olika densitet.

Mätdata har anpassats till (6.4) både med och utan temperaturkorrektion. Resultatet redovisas i Tabell 6.1 nedan i form av korrelation mellan mätt och modellerat tryckfall, standardavvikelse för modellfel, och framräknade engångsförluster per meter och för en våningshöjd av 3 m. Areaomräkningen har skett med $C_i = 0.9$, $A_i = 1.8 \text{ m}^2$ och $A_t = 3.8 \text{ m}^2$.

Tabell 6.1 Resultat för modellanpassning enligt (6.4)

korrektion	korrelation -	std(modellfel) Pa	$e_z \text{ m}^{-1}$	$e_n -$
nej	0.83	2.6	0.68	2.03
ja	0.80	2.8	0.66	1.97

Modellen utan temperaturkorrektion är något bättre än modellen med. Korrelationen är något högre och standardavvikelsen för modellfelet är något lägre. Skillnaden mellan de beräknade modellparametrarna är liten.

Engångsförlusten per våningsplan är något lägre jämfört med vad som bestämts med modellförsök till 2.5 för ett öppet trapphus och med halvtrappa enligt Jensen (2005).

Det skall dock påpekas att det verkliga trapphuset har en genomgående öppning mellan halvtrapporna med bredden 220 mm och längden 2000 mm med arean 0.44 m^2 . Det finns dessutom en omkring 40 mm bred glipa med arean 0.60 m^2 mellan våningsplan, viloplan och trappor mot trapphusets väggar bortsett från mindre bärande förbindningar och dörranslutningar. Detta ger en extra strömningsarea på minst 1 m^2 per våningsplan.

Tryckfallet för ett våningsplan kan skrivas för trapplöpsmodellen, för den extra strömningsvägen och båda sammantaget med var sitt samband som följer:

$$\Delta p = e_t \rho (q_t/A_t)^2/2 \quad (\text{Pa}) \quad (6.5)$$

$$\Delta p = e_x \rho (q_x/A_x)^2/2 \quad (\text{Pa}) \quad (6.6)$$

$$\Delta p = e_{tx} \rho ((q_t+q_x)/A_t)^2/2 \quad (\text{Pa}) \quad (6.7)$$

Uttrycken (6.5) och (6.6) ger ett samband mellan de två delflöden q_t och q_x som:

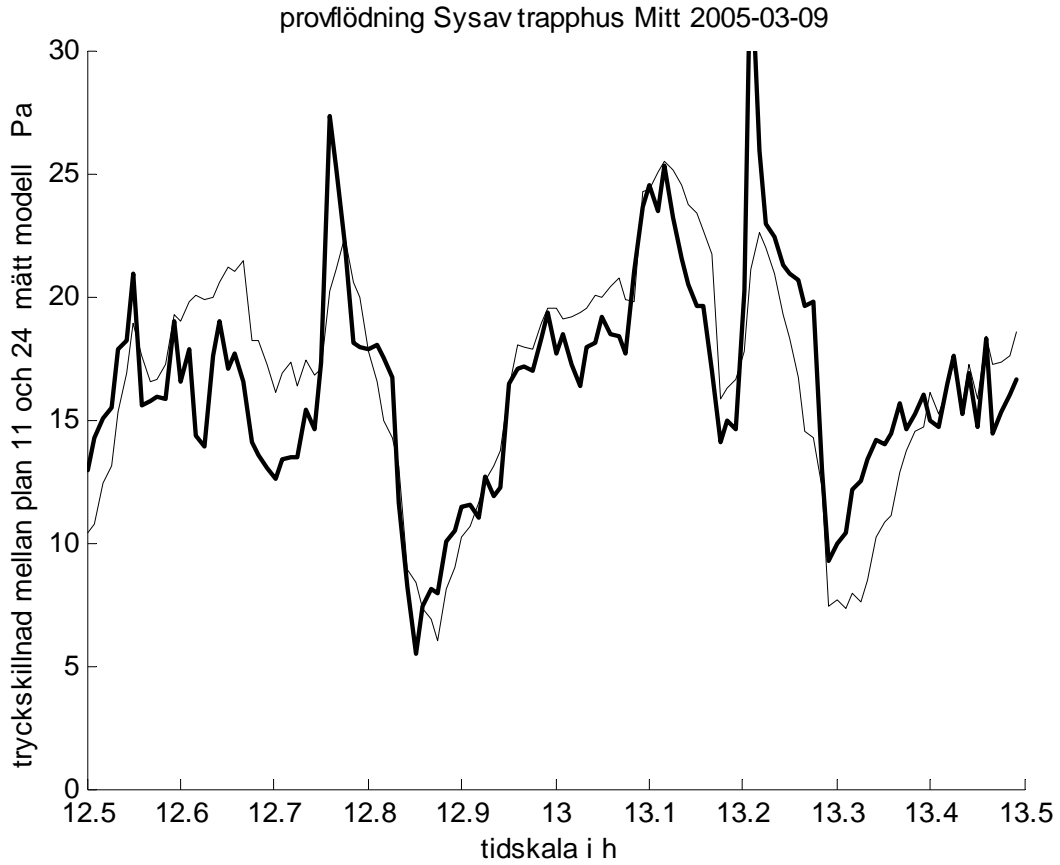
$$q_x = (A_x/A_t)(e_t/e_x)^{0.5} q_t \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (6.8)$$

Eliminering av q_x i (6.7) ger efter jämförelse med (6.5) sambandet:

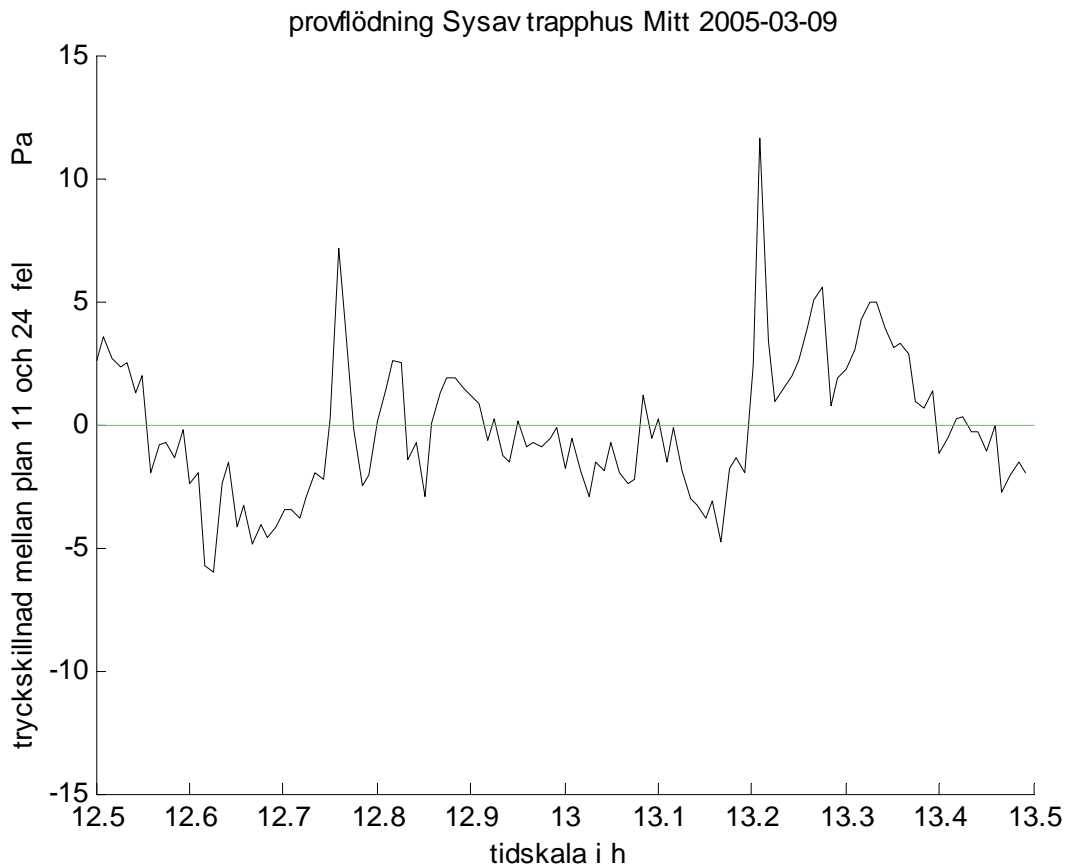
$$e_{tx} = e_t / (1 + (A_x/A_t)(e_t/e_x)^{0.5})^2 \quad (-) \quad (6.9)$$

Insättning av aktuella siffror $e_t=2.5$, $e_x=1$, $A_x=1 \text{ m}^2$ och $A_t=3.8 \text{ m}^2$ ger $e_{tx}=1.25$. Det skall dock påpekas att modellerna hade endast släta ramper, inga trappräcken och inga dörrnischer, vilket har bidragit till att modellerna underskattar tryckfallet i ett verkligt trapphus.

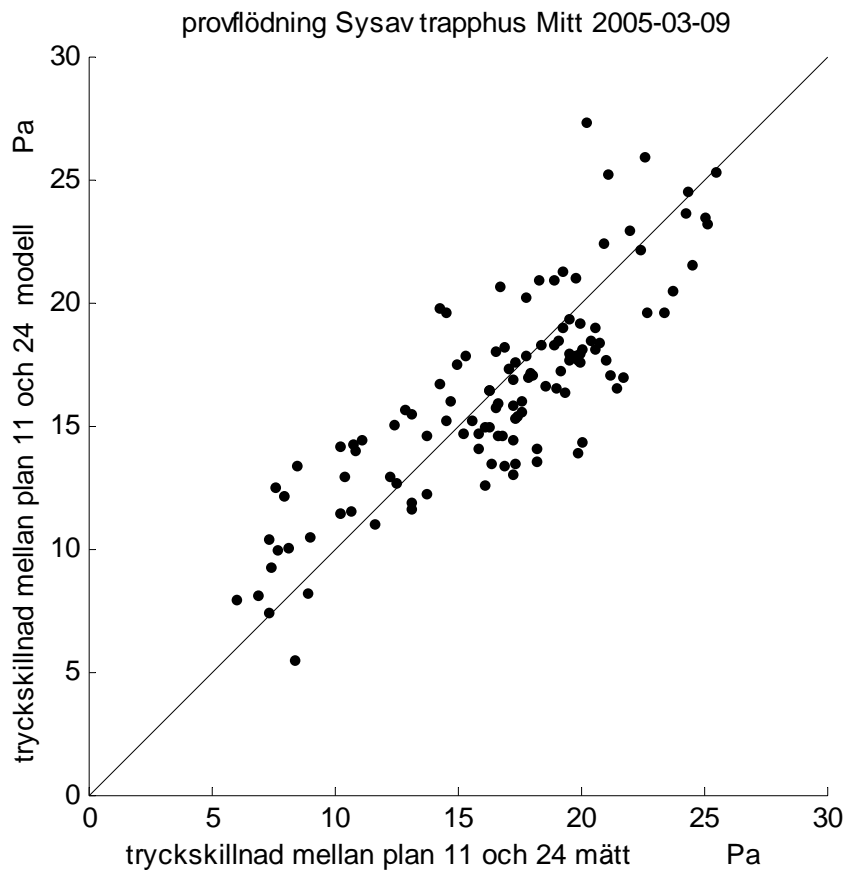
Resultatet från modellanpassningen redovisas med mätt och modellerat tryckfall i Figur 6.1, modellfel i Figur 6.2 och modellerat tryckfall som funktion av mätt tryckfall i Figur 6.3.



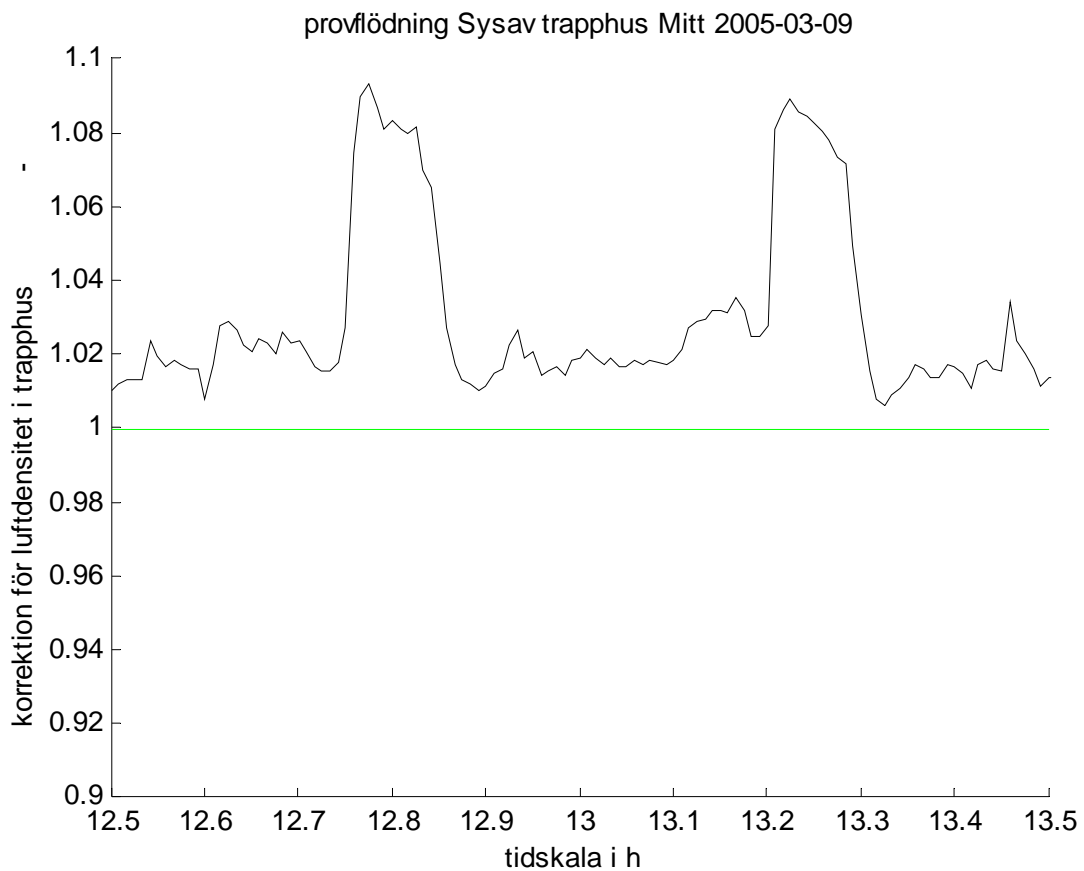
Figur 6.1 Mätt (tunn linje) och modellerat (fet) tryckfall vid provflödning av trapphus Mitt.



Figur 6.2 Modelfel för tryckfall vid provflödning av trapphus Mitt.



Figur 6.3 Modellerat tryckfall som funktion av mätt dito vid provflödning av trapphus Mitt.



Figur 6.4 Korrektionen ρ_i^2/ρ_t i (6.4) för mätdata vid provflödning av trapphus Mitt.

7 Bestämning av värmeöverföring i trapphus

Trycksättning av ett trapphus sker på enklaste sätt med uteluft. Uteluftens temperatur är inte den samma som trapphusets och kommer därför att närma sig trapphusets temperatur ju högre upp uteluften kommer. Trapphuset kommer givetvis över en längre tidsperiod att anta uteluftens temperatur. Det är dock startskedet som blir dimensionerande med en konstant trapphusyttemperatur.

Hur trapphusluftens temperatur ändras med höjden, när trycksättning sker med uteluft, är viktigt att känna till för att kunna beräkna om trycksättningen klarar det tillåtna begränsade övertrycksintervallet.

Den parameter som är av intresse är värmeöverföringsförmågan för trapphusets värmeöverförande ytor. Denna parameter kan anges som värmeövergångstal h W/Km² trapphusyta eller som värmeöverföringsförmåga per meter trapphus Ah alltså W/Km.

De redovisade temperaturerna i Figur 5.2 och flödet i Figur 5.5 kan användas för att skatta värmeöverföringsförmågan Ah W/Km. En enkel statisk värmebalans ställs upp nedan för luftflödet genom en delsträcka av trapphuset. Trapphusytornas temperatur antas vara konstant, men kan vara olika för olika delsträckor. Trapphusets temperatur ökar något med höjden.

$$0 = \rho c q (T_i - T_o) + Ah z_{io} (T_s - (T_i + T_o)/2) \quad (\text{W}) \quad (7.1)$$

där

Ah	trapphusets värmeöverföringsförmåga per meter, W/Km
ρ	luftflödets densitet, kg/m ³
c	luftens specifika värme, J/kgK
q	luftflöde, m ³ /s
T_i	luftflödets inloppstemperatur för en trapphussträcka, °C
T_o	luftflödets utloppstemperatur för en trapphussträcka, °C
T_s	trapphusets yttemperatur för en trapphussträcka, °C
z_{io}	trapphussträcka, m

Sambandet (7.1) kan skrivas om för att lösa ut den sökta värmeöverföringsförmågan för trapphuset Ah , vilket blir:

$$Ah = \rho c q (T_o - T_i) / (z_{io} (T_s - (T_i + T_o)/2)) \quad (\text{W/Km}) \quad (7.2)$$

Tre delsträckor z_{io} med måtten 19.5, 19.5 och 39 m används, nämligen från plan 11 till 17.5, från plan 17.5 till 24 respektive från plan 11 till 24. Trapphustemperaturen T_s i (7.2) är okänd, men den ökar med höjden från omkring 20 till 25 °C. Skattningen av parametern Ah skall ge samma värde för de tre mätsträckorna om trapphustemperaturen är rätt.

Några beräkningar har gjorts med medeltemperaturer för fall där inloppstemperaturen är lägre än 15 °C och resultatet redovisas i Tabell 7.1 nedan och i Figur 7.1 för fall 4 och de utvalda mätperioderna.

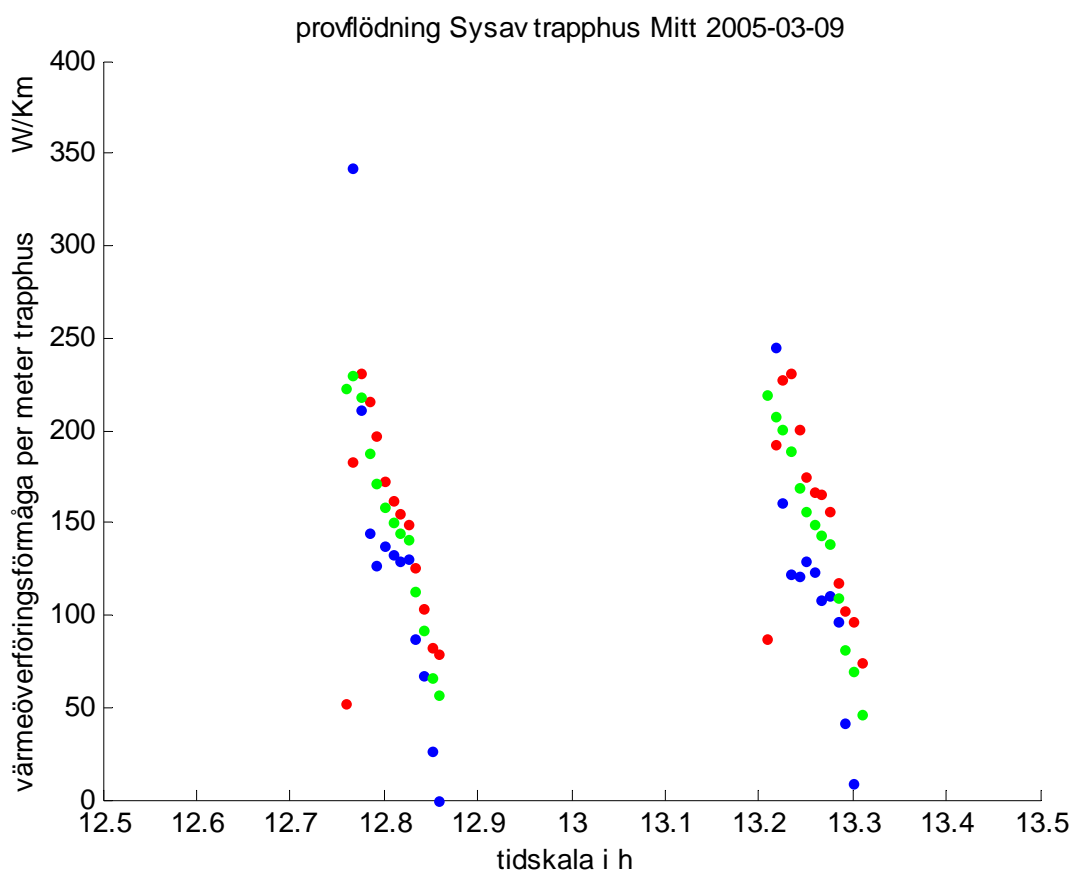
Tabell 7.1 Trapphustemperatur och värmeöverföringsförmåga för trapphus

plan	11-17.5		17.5-24		11-24	
fall	T_s °C	Ah W/Km	T_s °C	Ah W/Km	T_s °C	Ah W/Km
1	21.5	127	24.5	178	23.0	147
2	21.0	134	25.0	167	23.0	147
3	20.5	143	25.5	158	23.0	147
4	20.0	152	26.0	150	23.0	147

Siffrorna i Tabell 7.1 visar att för fall 4 med medeltemperaturerna 20, 26 och 23 °C för de tre trapphussträckorna blir trapphusets värmeöverföringsförmåga omkring 150 W/Km.

Trapphusets yta per meter kan beräknas till minst 30 m². Detta ger ett värmeövergångstal på omkring 5 W/Km², vilket är rimligt för en lufthastighet på omkring 1 m/s.

Simulering av trycksättning med uteluft har genomförts tidigare med liknande värmeövergångstal 50, 100 och 200 W/Km och redovisas i Jensen (2002). Det visar sig att den simulerade övertrycksprofilen är ganska lika för de tre angivna fallen. Slutsatsen är att valet av värmeövergångstal inte är känsligt utan värdet 5 W/Km² kan ge ett bra resultat.



Figur 7.1 Beräknad värmeöverföringsförmåga Ah W/Km för fall 4 enligt Tabell 7.1.

8 Sammanfattning och slutsatser

Syftet med detta arbete är att bestämma täthet hos trapphus särskilt dess dörrar, tryckfall i trapphus och värmeöverföringsförmåga för trapphusytor till trapphusluft. Möjligheterna till att trycksätta höga trapphus avsedda för utrymning bestäms till en väsentlig del av dessa två egenskaper.

Tätheten hos trapphus och tillhörande dörrar har bestämts för tre olika trapphus med minst tio inåtgående dörrar var med nio provtryckningar och totalt trettiosex mätserier. En följd av provtryckningar med samma trapphus visade att läckaget berodde på om trapphusdörrarna var tryckta utåt eller inåt eller ingetdera.

Det genomsnittliga läckaget för en trapphusdörr bestämdes till 40 l/s vid 50 Pa övertryck. Detta värde kan räknas om till en effektiv läckarea som för fri utströmning är lika med en spalt med en längd lika med dörrens omkrets 5.8 m och en bredd mindre än 0.8 mm.

Fyra strömningstekniska modeller för dörrläckaget testades. Den bästa modellen bestod av en laminär spaltförlust kopplad i serie med en turbulent engångsförlust som vid fri utströmning. De bestämda fysikaliska modellparametrarna såsom spalltlängd i strömningens riktning och spaltbredd tvärs densamma var rimliga.

En rent numerisk modell indikerade att tryckfallet var en funktion av flödet med en flödesexponent i intervallet (1,2) motsvarande laminär till turbulent strömning. Resultatet blev flödesexponenter i intervallet (1.14, 1.84) med ett medelvärde på 1.55. Detta innebär att strömningen är en blandning av laminär och turbulent strömning.

Tryckfallet har bestämts för det högsta trapphuset med naturlig strömning genom en dörr nederst och en taklucka överst. Den framräknade engångsförlusten per våningsplan blev 2.0 för en våningshöjd om 3 m. Detta stämmer delvis med värdet 2.5 från modellförsök för ett öppet trapphus (utan mittvägg) och med halvtrappor. Det lägre värdet för fullskala beror på en nästan genomgående glipa om 40 mm in mot trapphusväggen och ett fritt utrymme mellan trapplöpen. Den sammantagna arean är omkring 1 m² och en enkel analys visar att den resulterande engångsförlusten för strömning som till en del följer trapplöpet och till en del den mer raka vägen halveras från 2.5 till 1.25.

Det erhållna tryckfallet kan också jämföras med vad som redovisats i litteraturen av Klote och Milke (1992) med hänvisning till Tamura och Shaw (1976) och Achakji och Tamura (1988). Engångsförlusten per meter kan beräknas till 1 med angivna formler och uppgifter för ett öppet trapphus utan någon personbelastning. Samma förlust för ett våningsplan för våningshöjden 3 m blir därför 3.

Det går också att beräkna tryckfall för strömning genom en sluten trappa som om den vore en rektangulär luftkanal och med uppgifter från Miller (1978) fås en engångsförlust omkring 3 för ett våningsplan. Skillnaden är liten mellan heltrappa och halvtrappa.

Värmeöverföringsförmåga för trapphusets alla inre ytor har med uppmätta trapphus-temperaturer på tre nivåer och trapphusflöde bestämts till 150 W/Km. Den inre ytan är 30 m²/m och detta ger ett värmeövergångstal på 5 W/Km², vilket är rimligt för en lufthastighet på 1 m/s för ett luftflöde som följer själva trapplöpet.

9 Referenser

- Achakji, G.Y. och Tamura, G.T. (1988)
Pressure drop characteristics of typical stairshafts in high-rise buildings.
ASHRAE Transactions 94(1) 1223-1236
- Jensen, Lars (1999)
Konstanttrycksättning av trapphus för utrymning
TABK--99/7054
- Jensen, Lars (2002)
Stairwell flow pressurization with outdoor air as inlet air
TABK--02/7062
- Jensen, Lars (2005)
Tryckfall i trapphus - Modellförsök
TVIT--05/7001
- Klote, J. H. and Milke, J. A. (1992)
Design of Smoke Management Systems
ASHRAE
- Miller, D.S. (1978)
Internal flow systems
BHRA Fluid Engineering
- Minneapolis Blower Door (1993)
Operation Manual Model 3
The Energy Conservatory
- Tamura, G.T. and Shaw, C.Y. (1976)
Air leakage data for the design of elevator and stair shaft pressurization systems.
ASHRAE Transactions 82(2) 179-190