

Trycksättning av trapphus för utrymning

Slutrapport - BRANDFORSK 330-031

Lars Jensen

© Lars Jensen, 2005

ISRN LUTVDG/TVIT-05/7004--SE(78)

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

Innehållsförteckning

	Sammanfattning	5
1	Inledning	7
	Bakgrund	7
	Trapphus för utrymning	8
	Syfte	11
	Metod	12
	Avgränsningar	12
	Resultat	14
	Referensgrupp	16
2	Modell och känslighetsanalys	17
	Enkel analys av övertryckets läckageberoende variation	30
	Enkel analys av övertryckets personlastberoende variation	33
	Enkel analys av övertryckets temperaturberoende variation	36
	Enkel analys av övertryckets temperaturoberoende variation	39
	Jämförelse med exakt beräkning	42
3	Dimensioneringsuttryck	43
4	Test av olika trycksättningsmetoder	51
	Flödestrycksättning reglerad öppning	52
	Flödestrycksättning programstyrd öppning	54
	Flödestrycksättning till/frånstyrd öppning	56
	Flödestrycksättning anpassat läckage	58
	Statisk trycksättning	60
	Kommentarer	62
5	Handbok - arbetsgång	63
	Trycksättning av låga trapphus	63
	Övertrycksintervall för trycksättning utan slussar	64
	Övertrycksintervall för trycksättning med slussar	67
	Trycksättning utan utluftning	68
	Modellparametrar för trycksättning med utluftning	69
	Trycksättning med utluftning	71
	Dimensionering av trycksättningsfläkt och utluftning	74
	Funktionskontroll av trycksättning	75
6	Referenser	77

Sammanfattning

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, och räddnings- och släckningsinsatser.

Problemet med trycksättning av trapphus är att övertrycket begränsas neråt för att förhindra brandgasspridning till trapphuset och uppåt för att dörrar till trapphuset skall kunna öppnas med rimlig kraft. Detta övertrycksintervall begränsar den termiska tryckskillnaden inom trapphuset jämfört med utomhus och därmed även den möjliga trapphushöjden. Amerikansk praxis är att dela upp trapphus i sektioner från 8 upp till 12 våningsplan.

Det finns dock en förbisedd lösning på detta problem. Den vintertid normala termiska tryckökningen uppåt kan elimineras med ett genom trapphuset nerifrån och uppåt genomströmmande flöde som skapar ett tryckfall per höjdmeter lika med den termiska tryckändringen per höjdmeter. Slutsatsen är därför att trapphus inte behöver sektioneras för att klara av det tillåtna övertrycksintervallet.

Den föreslagna trycksättningsmetoden kräver dock någon form av reglering av övertrycket överst i trapphuset utöver den normala regleringen av övertrycket nederst i trapphuset. Trycksättningsfläkten ansluten nederst blir givetvis större men i gengäld blir trapphuset mycket bättre genomventilerat. Den övre tryckregleringen kan förenklas i en del fall genom att använda sig av en fix avluftningsarea som öppnas vid brand och låga utetemperaturer. Det är också möjligt att trapphus med stora läckage kan trycksättas inom det önskade tryckintervallet utan någon övre avluftning.

Trycksättning av trapphus med utluftning kan beskrivas som att eliminera skillnaden mellan två stora tal. De två talen är den termiska tryckändringen och det strömningstekniska tryckfallet för hela trapphuset. Båda tryckändringarna påverkas direkt eller indirekt av uteklimatet, personbelastningen och trapphusets specifika läckage, tryckfall och värmeöverförings-förmåga.

Trycksättning av trapphus kan beskrivas med tre samband för trapphusövertrycket, trapphusflödet respektive trapphustemperaturen, vilka redovisas i avsnitt 2. Varje samband har en specifik modellparameter. Dessa tre samband bildar den modell som kan simuleras med godtyckliga förutsättningar.

Ett simuleringsresultat är att uteluft som trycksättningsluft i stället för inneluft minskar den möjliga trapphushöjden något för fallet med utluftning. Detta något motsägelsefulla resultat beror på att övertryckets variation ökar eftersom den termiska tryckändringen är noll med uteluft i början av trapphuset samtidigt som det flödesberoende tryckfallet är som störst. Trapphusflödet avtar med läckaget uppåt. Övertryckets variation är begränsat till övertryckets tillåtna intervall och en ökad variation kan bara minskas med en mindre trapphushöjd.

Trycksättning med uteluft och utan utluftning ökar den möjliga trapphushöjden obetydligt, eftersom trycksättningsluften värms upp till normal trapphustemperatur efter en kort sträcka på grund av det förhållandevis låga flödet.

Personbelastningen ökar det specifika tryckfallet för personbelastade delar av trapphuset och påverkar den möjliga trapphushöjden starkt. Skillnaden är stor jämfört med ett tomt trapphus. Ett fördubblat tryckfall för trapphusets nedre halva ligger nära det värsta fallet.

En beräkningsmodell för att med simulering undersöka trycksättning med utluftning redovisas i avsnitt 2. Parameterkänslighet undersöks för ett antal förenklade fall med inverkan av en parameter åt gången. En alternativ iterativ metod för att undersöka möjligheten att trycksätta höga trapphus redovisas i avsnitt 3 och testas på ett stort antal kombinationer av parameterfall. Det beräknade lägsta övertrycket stämmer ganska bra med det exakt simulerade.

Trapphusets specifika läckage har undersökts för tre höga trapphus. Dörrläckaget dominerar och påverkas också påtagligt om dörrarna utsätts för en kraft med eller mot den från själva trycksättningen.

Trapphusets specifika tryckfall har undersökts med åtta trapphusmodeller i skala 1:50. Tryckfallet kan beskrivas med som en engångstryckförlust lika med en engångsförlustfaktor multiplicerad med det dynamiska trycket för trappans nominella strömningstvärsnitt. Engångsförlustfaktorn för ett våningsplan är lägst för en öppen halvtrappa, 2.5, och högst för en sluten heltrappa, 4.2. Trappbredden har ingen inverkan på engångsförlusten. En fördubblad trappbredd och ett fördubblat flöde ger samma tryckfall, eftersom hastigheten är densamma. Modellförsök gav något högre värden än en verklig öppen halvtrappa som inte täckte trapphusets inre bottenyta.

Trapphusets specifika värmeöverföringsförmåga har kontrollerats i ett fullskaleförsök och kan beräknas med ett värmeövergångstal på 5 W/Km^2 och trapphusets inre kontaktytor. Ett halverat värde eller ett fördubblat värde påverkar övertryckets variation nästan lika mycket.

Fyra trycksättningsmetoder med fast, växlande, styrd och reglerad utluftning har undersökts i avsnitt 4. Utluftning behövs först när utetemperaturen understiger ett givet värde. Skillnaden mellan fast och växlande utluftning är tekniskt sett liten och den växlande är därför att föredra. Den styrda utluftningen kan vara tekniskt sett svårare att förverkliga än den reglerade utluftningen, vilket gör att den reglerade är att föredra. Fördelen med den reglerade utluftningen är att den är parameterkänslig. De tre metoderna med fast, växlande och styrd utluftning måste alla kontrolleras och injusteras, eftersom antagna modellparametrar kan skilja sig från de verkliga. En nackdel med den reglerade utluftningen med reglerat trapphusövertryck nederst och överst är att de två reglerkretsarna påverkar varandra.

Själva arbetsgången för att välja metod och dimensionera trycksättning beskrivs i avsnitt 5. Detta avsnitt kommer att kompletteras med en arbetsrapport som behandlar tre exempel med trapphushöjderna 60, 120 och 180 m.

Slussar är ett sätt att fördubbla den möjliga trapphushöjden främst för fallet utan utluftning. Den möjliga trapphushöjden kan ökas ytterligare om slussdörrar har ett dörrtrycke som ger en hävarmseffekt eller som tryckavlastar med en liten lucka innan själva dörren kan öppnas.

Trycksättning av trapphus behöver inte vara den enda lösningen. En snarlik metod är indirekt trycksättning genom att brandgasventilera den brandutsatta lokalen. Skyddet mot brandgasspridning blir dock sämre när lokalen på något sätt tryckavlastas. Den termiska tryckökningen i trapphuset kan vara tillräcklig, när trapphuset är varmare än omgivningen.

1 Inledning

Bakgrund

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 och uppåt av en högsta tryckskillnad, omkring 80 Pa, för att dörrar till trapphuset skall kunna öppnas med rimlig kraft. Den termiska tryckskillnaden inom trapphuset jämfört med utomhus får därför högst vara 60 Pa. En temperaturskillnad på 43 °C mellan innetemperaturen 20 °C och utetemperaturen -23 °C ger en termisk tryckskillnad på 2 Pa/m. För de här angivna siffervärdena begränsas då höjden för ett trapphus till 30 m. Amerikansk praxis är att dela upp trapphus i sektioner från 8 upptill 12 våningsplan. Man tror därför att högre trapphus alltid måste sektioneras.

Det finns dock en förbisedd lösning på detta problem. Den vintertid normala termiska tryckökningen uppåt kan elimineras med ett genom trapphuset nerifrån och uppåt genomströmmande flöde som skapar ett tryckfall per höjdmeter lika med den termiska tryckändringen per höjdmeter. Vad som förbisetts tidigare är att trånga trapphus (inte paradtrapphus) även vid måttliga flöden och rimliga lufthastigheter kan ha tryckfall av samma storleksordning som den termiska tryckändringen.

Slutsatsen är därför att trapphus inte behöver 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. Trapphuset kan alltså inte användas som en stor luftkanal för att trycksätta andra utrymmen av byggnaden.

Den föreslagna trycksättningsmetoden kräver dock någon form av reglering av övertrycket överst i trapphuset utöver den normala regleringen av övertrycket nederst i trapphuset. Trycksättningsfläkten ansluten nederst blir givetvis större men i gengäld blir trapphuset mycket bättre genomventilerat. Den övre tryckregleringen kan förenklas i en del fall genom att använda sig av en fix avluftningsarea som öppnas vid brand och låga utetemperaturer. Det är också möjligt att trapphus med stora läckage kan trycksättas inom det önskade tryckintervallet utan någon övre avluftning.

Trapphus för utrymning

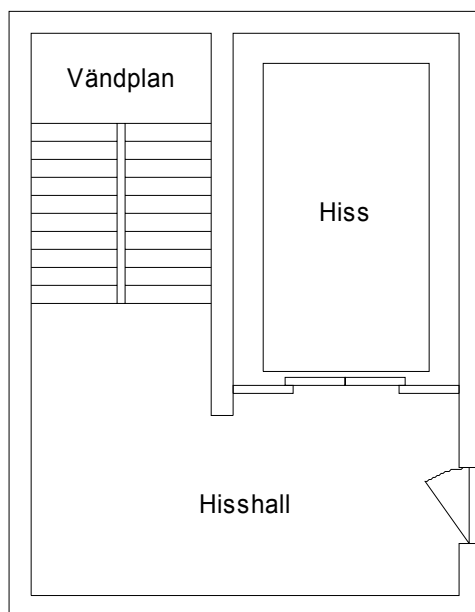
I BBR finns tre krav på utformningen av trapphus. De betecknas *trapphus Tr1* och *trapphus Tr2* och vanliga normala trapphus, som här betecknas *trapphus Trn*.

Bostäder och lokaler där personer vistas mer än tillfälligt skall ha minst två av varandra oberoende utrymningsvägar. Om bostaden eller lokalen har fler än ett våningsplan, skall det finnas minst en utrymningsväg från varje plan. Fönster godtas endast som utrymningsväg för bostäder upp till 8 våningsplan med hjälp av räddningstjänsten. Antalet utrymnande personer bedöms vara för stort för lokaler.

Kraven på trapphusen beror på om det är bostäder eller lokaler och på antalet våningsplan och det finns tre fall nämligen 1-8 våningsplan, 9-16 våningsplan och fler än 16 våningsplan. Kraven redovisas i sammanställningen nedan med beteckningarna *trapphus Tr1*, *trapphus Tr2* och *trapphus Trn*.

antal våningsplan	1-8	9-16	17-
bostäder	<i>Trn</i>	<i>Tr2</i>	<i>Tr1+Tr2</i>
lokaler	<i>Trn+Trn</i> eller <i>Tr2</i>	<i>Tr2+Trn</i> eller <i>Tr1</i>	<i>Tr1+Tr2</i>

Kravet för *trapphus Trn*, som visas i Figur 1.1, är att det skall finnas öppningsbara fönster eller brandgasventilation, vilken kan vara naturlig med en öppningsbar lucka mot det fria överst i trapphuset eller mekanisk med en brandgasfläkt ansluten överst i trapphuset. Hela trapphus är en enda brandcell.



Figur 1.1 Normalt *trapphus Trn*.

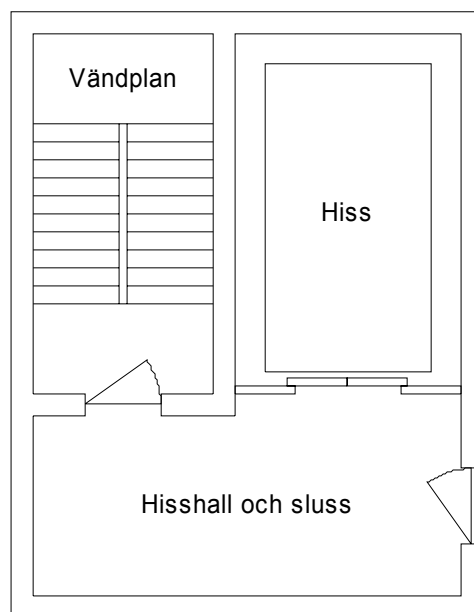
Notera att högst upp i höga *trapphus Trn* kan det tidvis uppstå höga övertryck som gör det svårt att öppna dörrar in mot trapphuset. Detta gäller särskilt om trapphuset nederst är öppet utåt.

Kravet för *trapphus Tr2* är att spridning av brand och brandgaser *skall begränsas*. Trapphuset skall ha en sluss, vilket kan vara en hisshall. Utformningen redovisas i Figur 1.2 nedan. Varje hisshall är en egen brandcell. Hisschaktet är också en egen brandcell och tryckavlastas överst med en lucka eller med en fläkt för att förhindra brandgasspridning.

Minst ett trapphus i bostadshus och kontor med 9 till 16 våningsplan skall utföras som *trapphus Tr2*.

Om det endast finns en enda utrymningsväg är kravet *trapphus Tr2* för bostäder och kontor med högst 8 våningsplan.

Notera att högst upp i höga *trapphus Tr2* kan det tidvis uppstå höga övertryck som gör det svårt att öppna dörrar in mot trapphusets hisshall från anslutande våningsplan. Detta gäller särskilt om trapphusets hisshall nederst har en öppen dörr. Hisschaktet kopplar samman de olika hissplanen. Samma sak gäller även för att kunna komma in i själva trapphuset från hisshallen, om dörren mellan våningsplan och hisshall är öppen.



Figur 1.2 *Trapphus Tr2* med hisshall som sluss.

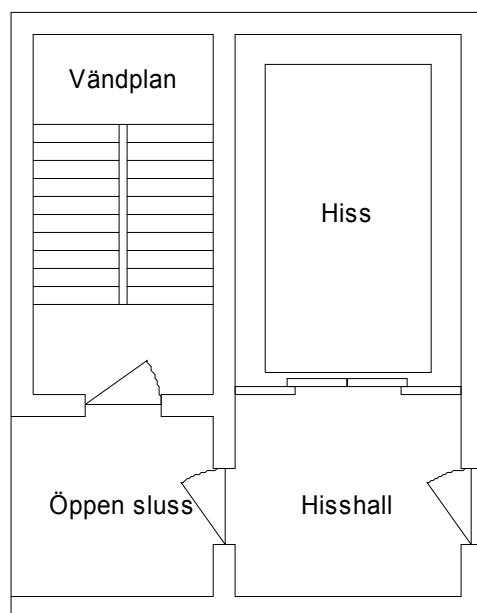
Kravet *trapphus Tr1* innebär att spridning av brand och brandgaser *skall förhindras* under minst 60 minuter. Utformningen redovisas i Figur 1.3 nedan. Trapphuset skall ha en *brandsluss* som antingen är öppen till det fria eller är försedd med en anordning som förhindrar brand- och brandgasspridning. Denna anordning kan vara trycksättning. . Varje hisshall är en egen brandcell. Hisschaktet är också en egen brandcell och tryckavlastas överst med en lucka eller med en fläkt för att förhindra brandgasspridning.

Minst ett trapphus i bostadshus och kontor över 16 våningsplan skall utföras som *trapphus Tr1*.

Om det endast finns en enda utrymningsväg är kravet *trapphus Tr1* för bostäder och kontor med 8 till 16 våningsplan.

Notera att ett trapphus över 16 våningar oftast är högre än 50 m, vilket med lösningen *brandsluss* kan resultera i allt för höga övertryck överst i trapphuset om den nedersta dörren är öppen. Metoden med statisk trycksättning kan inte heller användas. En lösning är att låta trapphuset vara ouppvämt och därmed kan trapphustemperaturen vara i stort sett lika med utetemperaturen, varvid inga termiska tryckskillnader uppstår.

Notera också att högst upp i höga *trapphus Tr1* kan det tidvis uppstå höga övertryck som gör det svårt att öppna dörrar in mot trapphusets hisshall från anslutande våningsplan. Detta gäller särskilt om trapphusets hisshall nederst har en öppen dörr. Hisschaktet kopplar samman de olika hissplanen.



Figur 1.3 *Trapphus Tr1* med sluss öppen mot det fria.

Syfte

Projektets syfte beskrevs i projektansökan med tretton delsyften som återges nedan. Efter varje syfte anges vad som blivit av det samma och var resultat finns dokumenterat i ett avsnitt i denna slutrapport eller på annat sätt.

- S₁ Enkla beräkningsuttryck för möjlig trapphushöjd under givna förutsättningar med inneluft och uteluft som trycksättningsluft
Se avsnitt 2 och 3 och Jensen (2002a), (2002c) och (2005c)
- S₂ Enkla beräkningsuttryck för att bestämma tryckfall i trapphus utifrån givna mått.
Se avsnitt 5 och Jensen (1999) och (2005a)
- S₃ Tryckfall med hjälp av egna modellförsök med trapphus med olika utformning
Se Jensen (1999) och (2005a).
- S₄ Tryckfall för några befintliga trapphus med egna mätförsök
Se Jensen (2005c).
- S₅ Läckage för några befintliga trapphus genom egen provtryckning
Se Jensen (2005c).
- S₆ Läckage för dörrar genom provtryckning
Se Jensen (2005c).
- S₇ Simuleringsmodeller för övertryck, flöde och temperatur
Se avsnitt 2.
- S₈ Metoder för att förenkla trycksättning med ingen, fast, efter klimatet växlande eller varierande avluftningsarea överst i trapphuset
Se avsnitt 4 och Jensen (2002b).
- S₉ Metoder för att trycksätta trapphus till en del utan fläktar.
Ej genomfört. En lösning är att övre delen av en byggnad har ett eget trapphus som inte är anslutet till den nedre delen. Den termiska tryckökningen över den nedre delen ger tillräckligt övertryck för att förhindra brandgasspridning. Den termiska tryckökningen över hela trapphuset begränsas med utluftning överst för att begränsa övertrycket uppåt.

- S₁₀ Metoder för att trycksätta trapphus med externa mobila fläktar
Utgått efter förslag från remissvar. De mobila fläktar som finns har inte tillräcklig kapacitet.
- S₁₁ Utformning av tryckslussar för att kunna tillåta högre övertryck i trapphus
Se Jensen (2002b).
- S₁₂ Handbok om trycksättning av trapphus där ovanstående punkter ingår
Se avsnitt 5.
- S₁₃ Kursdag om trycksättning av trapphus
Återstår.

Metod

Projektets arbetsgång har delats upp i mer eller mindre kronologiska och delvis överlappande steg som följer de olika punkterna tidigare angivna för projektets syfte. De metoder som har använts är litteraturstudier, teoretiskt modellbygge, mät försök med trapphus i modellskala och i full skala, analys av mätdata och anpassning av beräkningsmodeller och simuleringsmodeller till mätdata och brukandet av dessa modeller för undersökning och utformning av trycksättning.

Olika beräkningsuttryck för maximal trapphushöjd, tryckfall i trapphus, läckage i trapphus och särskilt dörrläckage har tagits fram från fysikaliska samband. Dessa samband har kontrollerats med modellförsök och med fullskaleförsök. En simuleringsmodell för övertryck, flöde och temperatur har tagits fram med hjälp av teoretiska modeller och experimentella resultat.

Förenklad trycksättning med ingen, fast, efter klimatet växlande eller varierande avluftningsarea överst i trapphuset har undersökts med hjälp av den framtagna simuleringsmodellen.

Avgränsningar

Denna forskningsrapport behandlar enbart hur trycksättning av trapphus kan beräknas och utformas med olika metoder.

Denna forskningsrapport behandlar inte hur föreskrifter i BBR om *trapphus Tr1* och *trapphus Tr2* skall uppfyllas.

Det trycksatta trapphuset antas vara anslutet direkt till byggnadens olika våningsplan och inte till någon hisshall. Våningsplanen antas endast vara i förbindelse med den yttre omgivningen, med hisshall och med trapphus för utrymning.

Trapphus anslutna till hisshallar ingår inte. Alla hisshallar på olika våningsplan är ihopkopplade genom läckande hissdörrar (icke slagdörrar) och hisschakten, vilket medför att trycksättningen blir ett annat och svårare problem att lösa.

Våningsplanens läckage kan antas vara betydligt större än det sammanlagda läckaget för alla dörrar till själva våningsplanet. Detta innebär att uteluftstryck kan antas råda på varje våningsplan och att hela trapphusövertrycket tas upp av trapphusdörren. Om förhållandet mellan läckarean för trapphusdörren och för våningsplanets fasad är $1:m$, är förhållandet mellan tryckskillnad över trapphusdörren och fasaden omkastat $m^n:1$, där parametern $n=1$ för laminära läckförluster och $n=2$ för turbulenta läckförluster.

Ventilationens inverkan har försumrats. Detta kan göras om varje våningsplan har ett eget ventilationssystem. Om ett gemensamt ventilationssystem är i drift, kan våningsplanen betraktas som ej sammankopplade. Motsatsen gäller om ett gemensamt ventilationssystem är ur drift och utan några avstängande spjäll i kanalsystemen för både tilluft och frånluft.

Sommarfallet har uteslutits, vilket motsvaras av att utetemperaturen är högre än innetemperaturen. Statisk trycksättning för sommarfallet måste uppfylla följande förenklade krav:

$$h < 20(p_{max} - p_{min})/\Delta T \quad (m)$$

där

h	trapphushöjd
ΔT	temperaturskillnad ute-inne, °C
p_{max}	högsta trapphusövertryck, Pa
p_{min}	lägsta trapphusövertryck, Pa

Övertrycksintervallet (20,80) Pa och en temperaturskillnad på 10 °C ger en högsta trapphushöjd på 120 m. En halvering av temperaturskillnaden till 5 °C ger en fördubblad trapphushöjd på 240 m.

Själva dimensioneringen av trapphuset för utrymning antas vara given. Kravet är att endast den brandutsatta brandcellen skall utrymmas. Utrymningstiden begränsas av när kritiska förhållanden i en brandcell uppnås. Detta bestäms av branden och lokalen. Den begränsade utrymningstiden och antalet utrymmande personer bestämmer antalet personer per tidsenhet som trapphuset eller trapphusen måste klara av. En tumregel är ett standardtrapphus med trappbredden 1200 mm har kapaciteten 1 person/s. Detta gäller också för en dörr med bredden 1 m. Lokaler med stor personbelastning kräver minst två trapphus varav ett antas vara blockerat.

Resultat

Projektets resultat redovisas här nedan med en kronologisk följd av artiklar, konferensbidrag och rapporter med ett kort referat och en korsreferens till vilket syfte som berörts med notationen S#. Antalet sidor anges inom parantes sist för varje referens.

Jensen, Lars (1999)
Konstanttrycksättning av trapphus för utrymning
TABK--99/7054 (43)

Rapporten redovisar en ny trycksättningsmetod för höga trapphus. Principen är att den termiska tryckändringen balanseras med ett lika stort tryckfall skapat av ett genomströmmande flöde. Tryckfallet eller engångsförlusten bestäms med två modelltrapphus i skala 1:100. Temperaturförhållandena i ett trycksatt och genomströmmat trapphus analyseras. Lägsta och högsta möjliga trapphusövertryck anges. S₂

Fagergren, Tomas och Jensen, Lars (2000)
Ny trycksättningsmetod i trapphus för utrymning
Energi & Miljö 3/2000 (5)

En kort artikel som redovisar en ny trycksättningsmetod för höga trapphus med en del material från Jensen (1999).

Jensen, Lars (2001)
Stairwell flow pressurization
International Conference on Engineered Fire Protection Design
pp 364-375, 11-15 June 2001 San Fransisco, CA (12)

En konferensbidrag som är ett utdrag av Jensen (1999).

Jensen, Lars (2002a)
Stairwell flow pressurization - a new method
TABK--02/7060 (30)

En rapport som redovisar enkla beräkningsuttryck för den maximala trapphushöjden med flödestrycksättning. Ett antal olika parameterfall och driftsfall redovisas också, dock utan personbelastning och med inneluft som trycksättningsluft. S₁

Jensen, Lars (2002b)
Maximal stairwell height for different pressurization methods
TABK--02/7061 (44)

En rapport som redovisar förenklingar av flödestrycksättning med fast utluftning, växlande utluftning, temperaturstyrd utluftning och tryckreglerad utluftning. Möjliga trapphushöjder redovisas som funktion av den termiska gradienten. Enkla beräkningsuttryck för utluftning redovisas också. Trapphushöjden kan fördubblas med en brandsluss/trycksluss med två tryckfallsmässigt identiska slussdörrar. S₈ S₁₁

Jensen, Lars (2002c)
Stairwell flow pressurization with outdoor air as inlet air
TABK--02/7062 (24)

Rapporten redovisar beräkningar med uteluft som trycksättningsluft. Den möjliga trapphushöjden minskar något jämfört med inneluft som trycksättningsluft, vilket beror på att övertryckets variation ökar med uteluft i stället för inneluft. S₁

Jensen, Lars (2003)
Stairwell flow pressurization - a new method
Journal of Fire Protection Engineering
pp 251-274, Volume 13 Number 4, 2003 (24)

Denna artikel är lika med Jensen (2002a) bortsett från några mindre ändringar.

Jensen, Lars (2004)
Föredrag om trycksättning av trapphus
BRANDFORSK infodag 2004-11-11 (41(powerpointbilder))

Detta föredrag presenterade metoden med flödestrycksättning med resultat från Jensen(2002abc).

Jensen, Lars (2005a)
Tryckfall i trapphus - Modellförsök
TVIT--05/7001 (27)

Rapporten redovisar modellförsök i skala 1:50 för alla åtta kombinationer mellan halvtrappa eller heltrappa, öppet eller slutet trapplopp och trappbredd 1 eller 2 m. Våningshöjden var 3 m. Engångsförlustfaktorn blev omkring 3 per våningsplan eller 1 per meter. Detta är tillräckligt för att med rimliga flöden balansera den termiska tryckgradienten. En sluten heltrappa har störst engångsförlust. En öppen halvtrappa har lägst engångsförlust. Trapphusbredden påverkar inte engångsförlusten. S₂ S₃

Jensen, Lars (2005b)
Täthet och tryckfall i trapphus - Fullskaleförsök
TVIT--05/7002 (45)

Rapporten redovisar provtryckning av tre höga trapphus med i huvudsak inåtgående dörrar. Läckaget minskade vid övertryck jämfört med undertryck. Läckaget ökade även när dörrarna pressades ut mot låskolven och omvänt minskade när dörrarna drogs igen. Läckflödet för en dörr var 0.04 m³/s vid en tryckskillnad om 50 Pa. Strömningen var en blandning av laminär och turbulent strömning. Tryckfallet bestämdes för det högsta trapphuset med naturligt självdrag med en öppen dörr nederst och två öppna luckor överst. Engångsförlusten per våningsplan blev något lägre än modellförsökens för en öppen halvtrappa. S₄ S₅ S₆

Jensen, Lars (2005c)
Trycksättning av trapphus med personbelastning
TVIT--05/7003 (35)

Rapporten redovisar att en ojämn personbelastning minskar möjligheterna att trycksätta höga trapphus. En hög personbelastning kan fördubbla tryckfallet. Det svåraste belastningsfallet är hög personbelastning i trapphusets nedre halva och ingen personbelastning i den övre halvan. S₁

Referensgrupp

Referensgruppen som utses av BRANDFORSK har bestått av följande personer:

Anna-Carin Olmedal	Brandkonsulten Kjell Fallqvist AB, Stockholm
Tomas Fagergren	Brandskyddslaget, Stockholm
Erik Egardt	Räddningsverket, Karlstad

Alla arbetsrapporter och denna slutrapport har översänts till referensgruppen som information och för att få synpunkter och rättelser. Två enskilda telefonmöten med Anna-Carin Olmedal och Tomas Fagergren gav många värdefulla synpunkter och förslag på förbättringar. Detta gäller också Erik Egardt som skickat skriftliga synpunkter.

Frågor kring dimensionering av utrymning och särskilt utrymning via trapphus har diskuterats ingående med Håkan Frantzich vid Avdelningen för brandteknik, LTH.

2 Modell och känslighetsanalys

Simulering är en enkel metod för att bestämma det dimensionerande inflödet som eliminerar den termiska tryckändringen med ett lika stort tryckfall. Olika inflöden och övertryck nederst kan provas manuellt eller med något automatiskt sökförfarande. Simuleringsmodellen bygger på tre kopplade differentialekvationer som funktion av den oberoende variabeln z för trapphusnivå.

En ekvation beskriver hur övertrycket $\Delta p(z)$ (Pa) påverkas och med ett positivt övertryck menas att trycket i trapphuset är högre än trycket i omgivningen. En andra ekvation anger hur trapphusflödet $q(z)$ (m^3/s) ändras och som definieras positivt uppåt. En tredje ekvation beskriver trapphusluftens temperatur $T(z)$ (K). Trapphusluftens densitet skrivs som $\rho(z)$ (kg/m^3) och kan beräknas med hjälp av trapphusluftens temperatur $T(z)$.

Differentialekvationen för övertrycket i trapphuset kan skrivas som:

$$\frac{d\Delta p(z)}{dz} = (\rho_o - \rho(z))g - (\rho(z) / \rho_o)R(z)q(z)^2 \quad (\text{Pa}/\text{m}) \quad (2.1)$$

Den första termen i (2.1) anger den termiska tryckändringen. Densiteten ρ_o är uteluftens densitet som också antas vara oberoende av höjden. Parametern g är gravitationen $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$. Den andra termen anger strömningstryckfallet. Notera att kvoten $\rho(z)/\rho_o$ gör att tryckfallet beror på trapphusluftens densitet. Densiteten ρ_n är densiteten när det specifika tryckfallet $R(z)$ bestämdes. Det specifika tryckfallet $R(z)$ varierar med personbelastningens storlek och läge, men för ett tomt trapphus är $R(z)$ en konstant.

Differentialekvationen för flödet ges av (2.2) nedan. Den första termen beskriver hur volymflödet ändras med temperaturen. Den andra termen beskriver hur volymflödet ändras på grund av läckaget. Massflödet kunde också använts som en variabel i beräkningsmodellen. Den första termen i (2.2) hade då givetvis inte funnits med.

$$\frac{dq(z)}{dz} = \frac{q(z)}{T(z)} \frac{dT(z)}{dz} - q_n (\Delta p(z) \rho_n / \Delta p_n \rho(z))^{0.5} \quad (\text{m}^3/\text{sm}) \quad (2.2)$$

Formuleringen enligt (2.2) gäller endast för övertryck, men kan enkelt ändras för att även gälla för undertryck genom att $\Delta p(z)^{0.5}$ skrivs om till $\text{sign}(\Delta p(z)) \text{abs}(\Delta p(z))^{0.5}$. De enda modellparametrarna i (2.2) är det nominella läckaget q_m med dimensionen m^3/sm och samhörande nominella övertrycket Δp_n och densiteten ρ_n .

Yttemperaturen antas vara konstant både i rummet och i tiden. Någon uppvärmning på grund av strömningens tryckförluster antas inte ske. En tryckförlust på $1.2 \text{ Pa}/\text{m}$ ger en uppvärmning av flödet på $0.001 \text{ K}/\text{m}$. Den naturliga temperatursänkningen, omkring $0.01 \text{ K}/\text{m}$, med ökande höjd och minskande absolut tryck försummas också.

Differentialekvationen för trapphusluftens temperatur i (2.3) tar endast hänsyn till värmeutbyte med de omgivande ytorna. Notera att flödet $q(z)$ i (2.3) kan inte vara noll.

$$\frac{dT(z)}{dz} = Ah(T_s - T(z)) / \rho(z)cq(z) \quad (\text{K/m}) \quad (2.3)$$

Den enda modellparametern i (2.3) är värmeöverföringsförmågan per meter trapphus, Ah , med dimensionen W/Km. Parametern Ah är en produkt mellan kontaktytan A och värmeövergångstalet h , som inte skall förväxlas med trapphushöjden också betecknad med h .

De tre kopplade differentialekvationerna (2.1-3) kan integreras över trapphusets hela höjd med givna startvärden för de tre oberoende variablerna för övertryck, volymflöde och temperatur för en given nivå z till exempel nederst i trapphuset. Det går också att med ett sökförfarande finna lösningar som uppfyller krav på att övertrycket överst i trapphuset skall vara lika med övertrycket nederst i trapphuset. Inloppsflödet ändras med enkel intervallhalvering tills det önskade kravet är uppfyllt. Inloppstemperaturen är normalt lika med utetemperaturen.

Det är viktigt att kontrollera hela lösningen. Övertrycket kan mycket väl underskrida lägsta tillåtna övertryck och även bli negativt, vilket innebär att det har läckt in luft från omgivningen på vissa nivåer.

Övertryckets variation vid flödestrycksättning med reglerad öppning överst är det som begränsar den möjliga trapphushöjden. De modellparameter som tillsammans påverkar övertryckets variation är läckaget, tryckfallet, personbelastningen, värmeöverföringsförmågan och utetemperaturen. Hur de olika modellparametrarna ovan påverkar övertryckets variation redovisas utgående från ett basfall med trapphushöjden är 100 m, inlopps- och trapphustemperaturen är 20 °C, utetemperaturen är -22.6 °C och övertryck nederst och överst är lika med 80 Pa. Den termiska gradienten blir 2 Pa/m.

Siffervärden för nominellt läckflöde, tryckfall för nedre och övre halva, värmeöverföringsförmåga, lägsta övertryck, inflöde, utflöde, effektiv öppningsarea överst, inlopps-, utlopps- och medeltemperatur redovisas i Tabell 2.1.

Läckflödets betydelse visas redovisat med fall 1-6 i Tabell 2.1 och i Figur 2.1-2. Tryckfallets inverkan utan personbelastning redovisas med fall 7-12 i Tabell 2.1 och i Figur 2.3-4. Värmeöverföringsförmågans inverkan visas med fall 13-18 i Tabell 2.1 och i Figur 2.5-7.

Inverkan av personbelastningens storlek f visas med fall 19-24 i Tabell 2.1 och i Figur 2.8-9 för brytpunkten 50 m med $R(z)=fR$ för $z < h/2$ och $R(z)=R$ för $z > h/2$. Samma sak för brytpunktens relativa läge p med fall 25-30 i Tabell 2.1 och i Figur 2.10-11 med de absoluta lägena ph 20, 30, 40, 60, 70 och 80 m och fall 21 med läge 50 m med $R(z)=fR$ för $z < ph$ och $R(z)=R$ för $z > ph$.

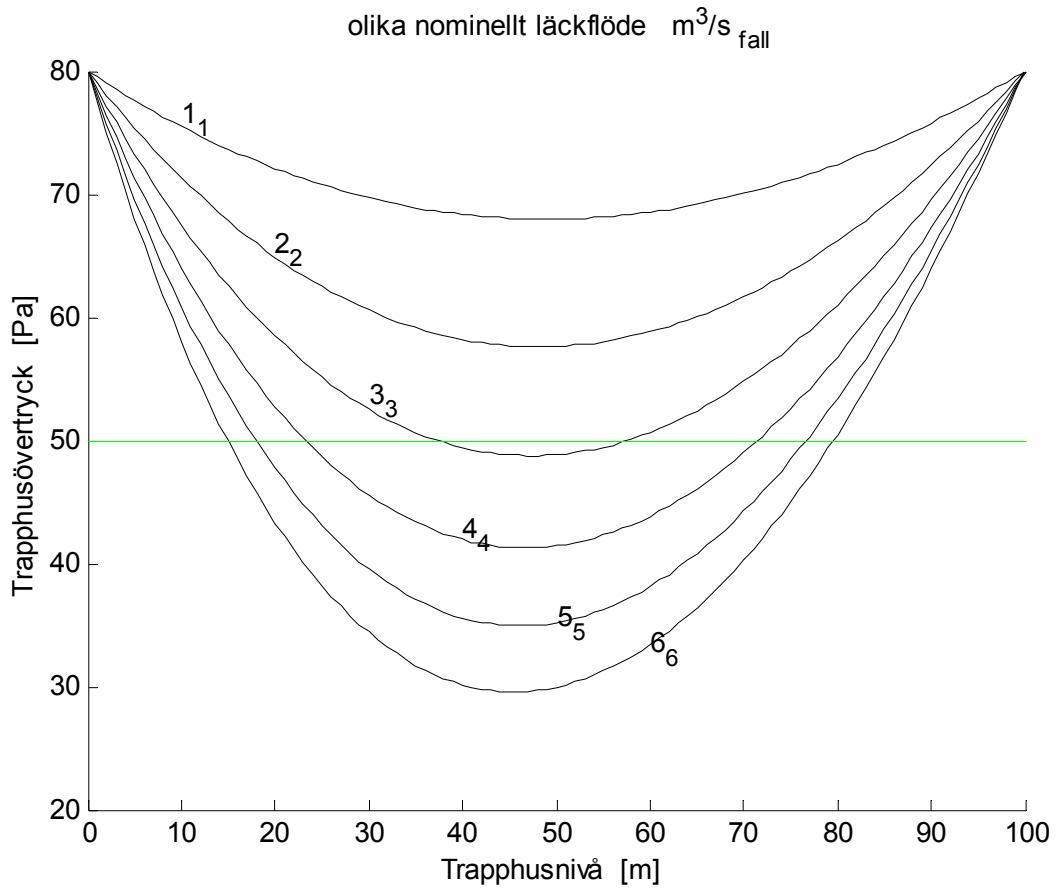
Utetemperaturens inverkan redovisas med fall 31-36 i Tabell 2.1 och i Figur 2.12-14.

Fall 1, 16 och 21 summeras som fall 37 och redovisas i Tabell 2.1 och i Figur 2.15-17.

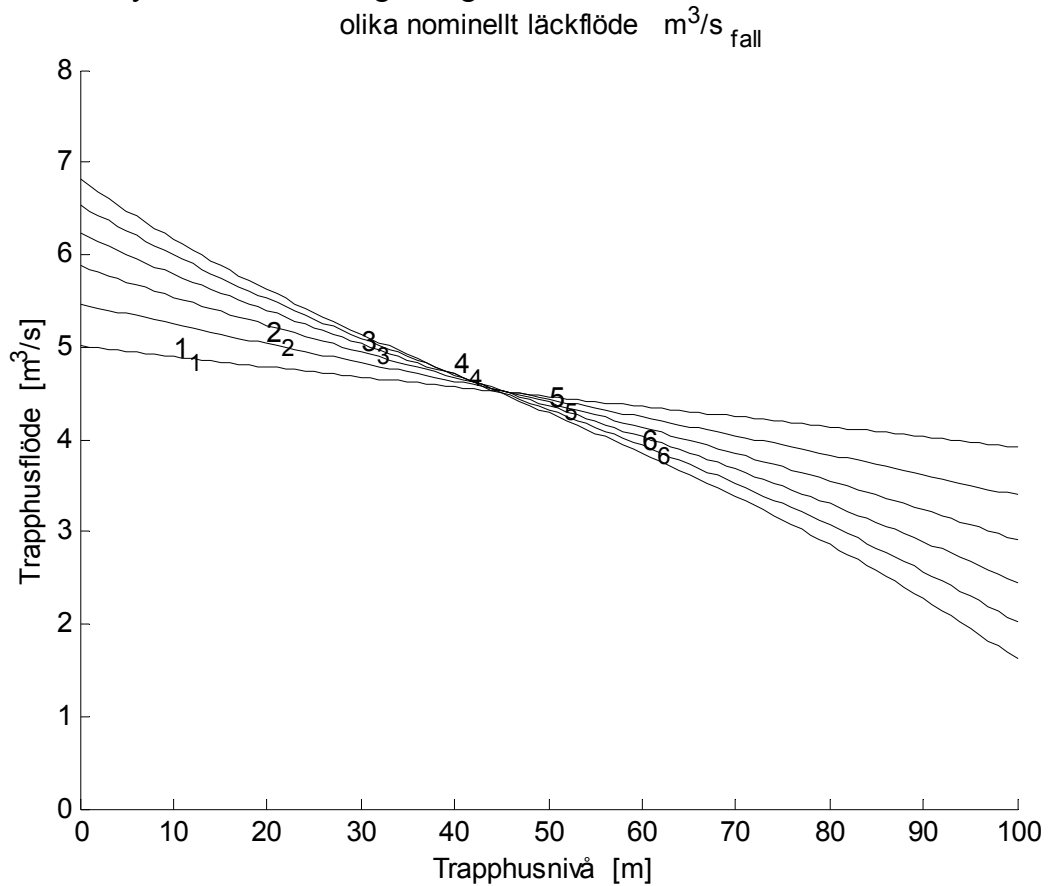
Tabell 2.1 Läckflöde, tryckfall 0-50 m, tryckfall 50-100 m, värmeöverföringsförmåga, lägsta övertryck, inflöde, utflöde, öppningsarea och temperaturer.

fall	figur	q_x m ³ /s	R_1 -1	R_2 -1	Ah -2	p_{min} Pa	q_i m ³ /s	q_o m ³ /s	A_o m ²	T_i °C	T_o °C	T_{med} °C
1	2.1-2	1.0	0.10	0.10	0	68.0	5.01	3.91	0.339	20.0	20.0	20.0
2	2.1-2	2.0	0.10	0.10	0	57.6	5.47	3.39	0.294	20.0	20.0	20.0
3	2.1-2	3.0	0.10	0.10	0	48.8	5.87	2.91	0.252	20.0	20.0	20.0
4	2.1-2	4.0	0.10	0.10	0	41.3	6.22	2.45	0.212	20.0	20.0	20.0
5	2.1-2	5.0	0.10	0.10	0	34.9	6.53	2.02	0.175	20.0	20.0	20.0
6	2.1-2	6.0	0.10	0.10	0	29.6	6.81	1.62	0.140	20.0	20.0	20.0
7	2.3-4	1.0	0.05	0.05	0	71.3	6.87	5.76	0.499	20.0	20.0	20.0
8	2.3-4	1.0	0.10	0.10	0	68.0	5.01	3.91	0.339	20.0	20.0	20.0
9	2.3-4	1.0	0.20	0.20	0	63.5	3.68	2.61	0.226	20.0	20.0	20.0
10	2.3-4	1.0	0.30	0.30	0	60.2	3.09	2.04	0.176	20.0	20.0	20.0
11	2.3-4	1.0	0.40	0.40	0	57.6	2.74	1.70	0.147	20.0	20.0	20.0
12	2.3-4	1.0	0.50	0.50	0	55.4	2.49	1.46	0.127	20.0	20.0	20.0
13	2.5-7	0	0.10	0.10	800	72.2	3.72	4.36	0.377	-22.6	20.0	17.0
14	2.5-7	0	0.10	0.10	400	67.5	3.62	4.24	0.367	-22.6	20.0	14.4
15	2.5-7	0	0.10	0.10	200	63.0	3.44	4.01	0.347	-22.6	19.3	9.8
16	2.5-7	0	0.10	0.10	100	61.4	3.13	3.61	0.313	-22.6	15.6	3.1
17	2.5-7	0	0.10	0.10	50	63.1	2.74	3.08	0.267	-22.6	8.4	-3.9
18	2.5-7	0	0.10	0.10	25	66.6	2.32	2.53	0.219	-22.6	0.2	-9.7
19	2.8-9	0	0.10	0.10	0	80.0	4.47	4.47	0.387	20.0	20.0	20.0
20	2.8-9	0	0.15	0.10	0	60.2	4.01	4.01	0.347	20.0	20.0	20.0
21	2.8-9	0	0.20	0.10	0	46.9	3.66	3.66	0.317	20.0	20.0	20.0
22	2.8-9	0	0.25	0.10	0	37.6	3.38	3.38	0.293	20.0	20.0	20.0
23	2.8-9	0	0.30	0.10	0	30.6	3.16	3.16	0.274	20.0	20.0	20.0
24	2.8-9	0	0.40	0.10	0	20.8	2.83	2.83	0.245	20.0	20.0	20.0
25	2.10-11	0	0.20	0.10	0	54.3	4.09	4.09	0.355	20.0	20.0	20.0
26	2.10-11	0	0.20	0.10	0	48.5	3.93	3.93	0.341	20.0	20.0	20.0
27	2.10-11	0	0.20	0.10	0	46.2	3.79	3.79	0.328	20.0	20.0	20.0
28	2.10-11	0	0.20	0.10	0	50.0	3.54	3.54	0.307	20.0	20.0	20.0
29	2.10-11	0	0.20	0.10	0	55.2	3.44	3.44	0.298	20.0	20.0	20.0
30	2.10-11	0	0.20	0.10	0	61.9	3.34	3.34	0.289	20.0	20.0	20.0
31	2.12-14	0	0.10	0.10	100	75.2	1.89	1.97	0.171	8.1	19.8	17.2
32	2.12-14	0	0.10	0.10	100	70.2	2.48	2.68	0.232	-2.9	19.0	12.9
33	2.12-14	0	0.10	0.10	100	65.6	2.85	3.19	0.276	-13.1	17.5	8.1
34	2.12-14	0	0.10	0.10	100	61.4	3.13	3.61	0.313	-22.6	15.6	3.1
35	2.12-14	0	0.10	0.10	100	57.5	3.35	3.97	0.344	-31.3	13.4	-1.9
36	2.12-14	0	0.10	0.10	100	53.9	3.52	4.29	0.371	-39.5	11.0	-6.9
37	2.15-17	1.0	0.20	0.10	100	31.0	2.98	2.53	0.219	-22.6	17.4	4.7

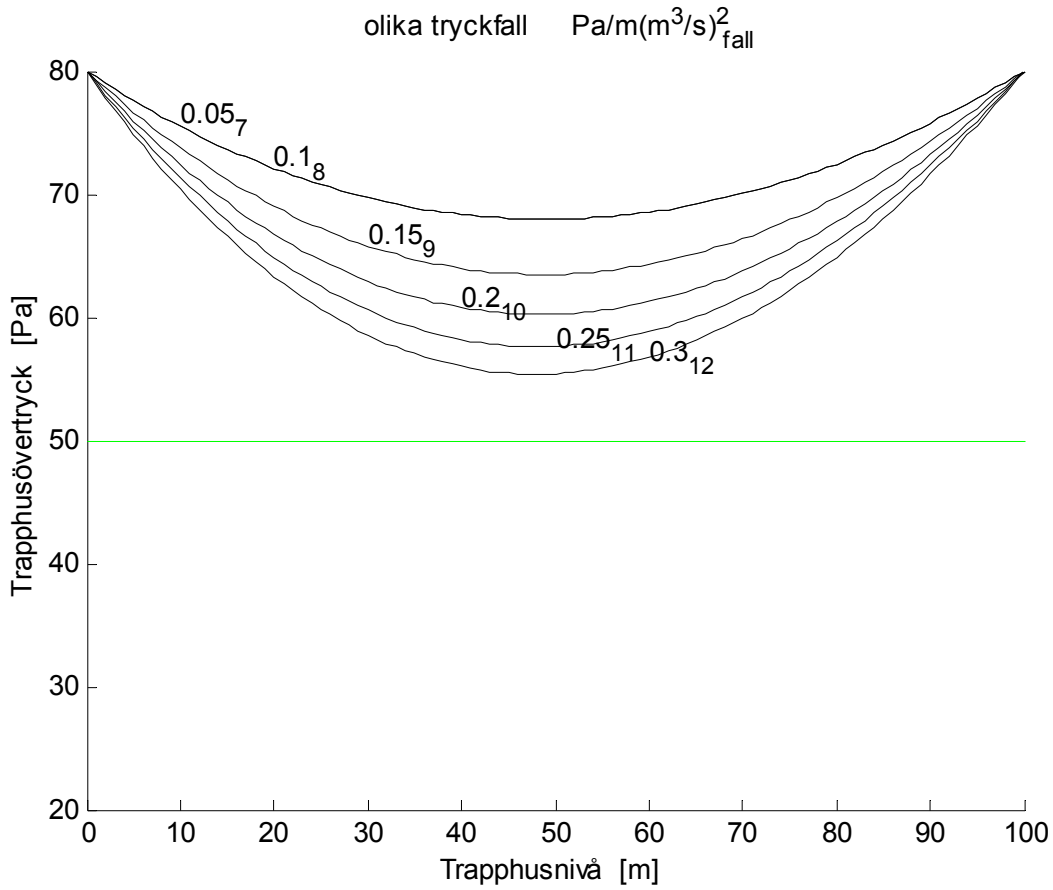
-1 Pa/m(m³/s)² -2 W/Km



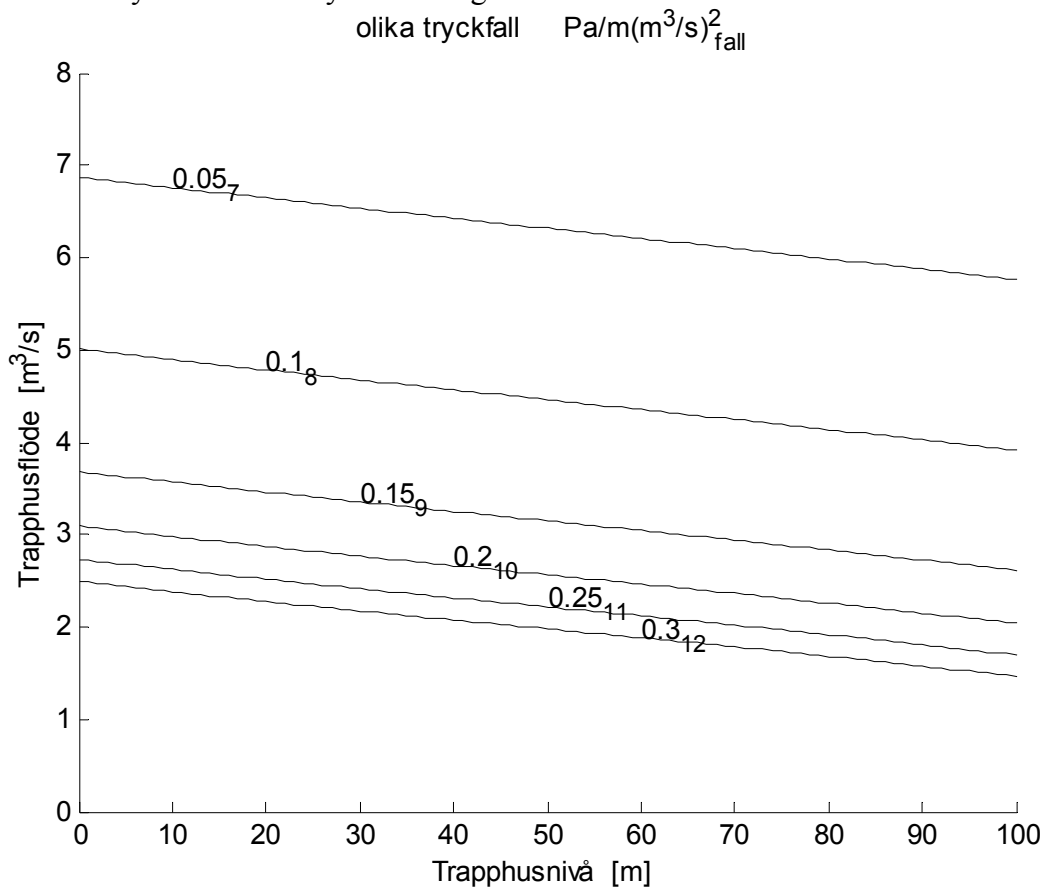
Figur 2.1 Övertryck vid olika läckage enligt fall 1-6 i Tabell 2.1.



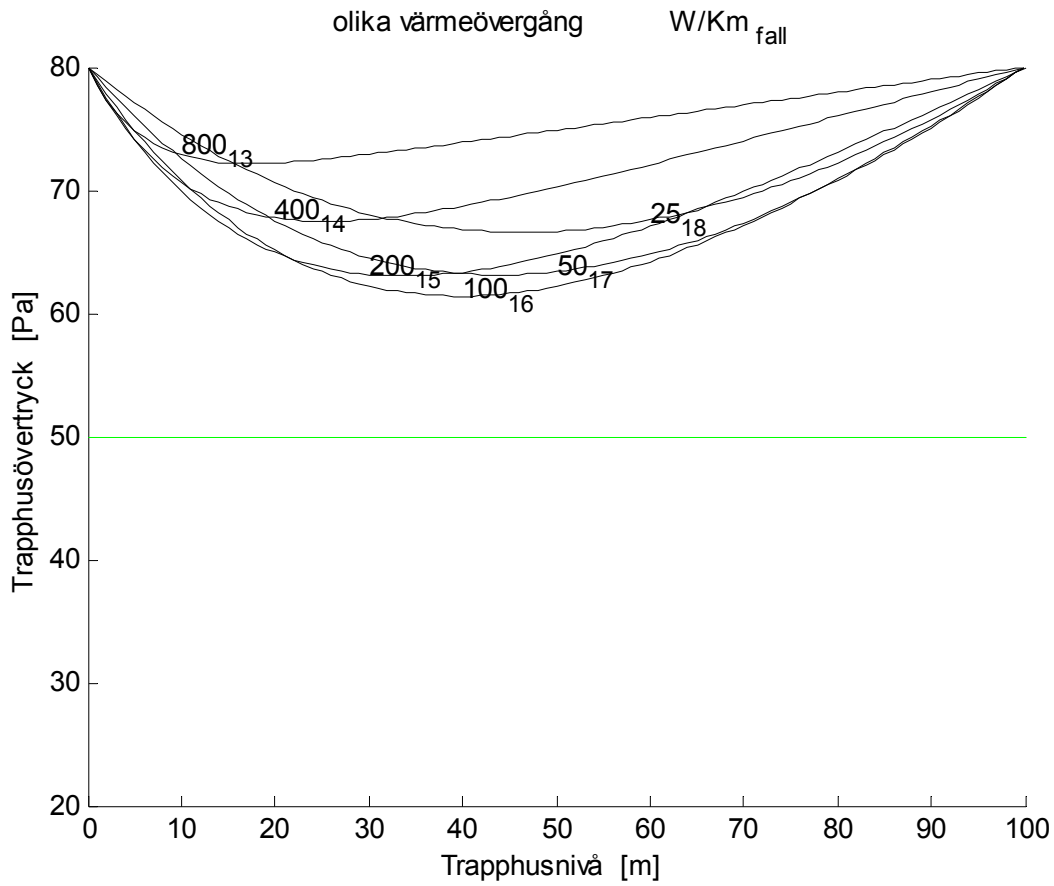
Figur 2.2 Flöde vid olika läckage enligt fall 1-6 i Tabell 2.1.



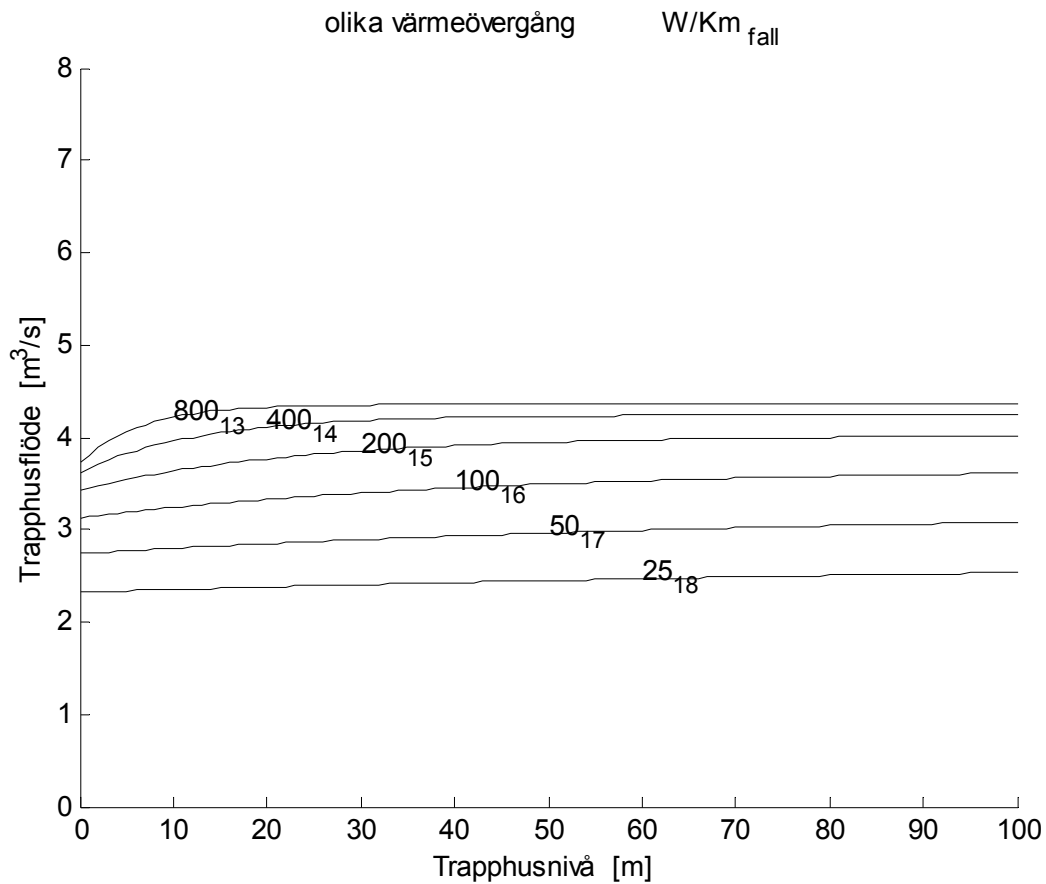
Figur 2.3 Övertryck vid olika tryckfall enligt fall 7-12 i Tabell 2.1.



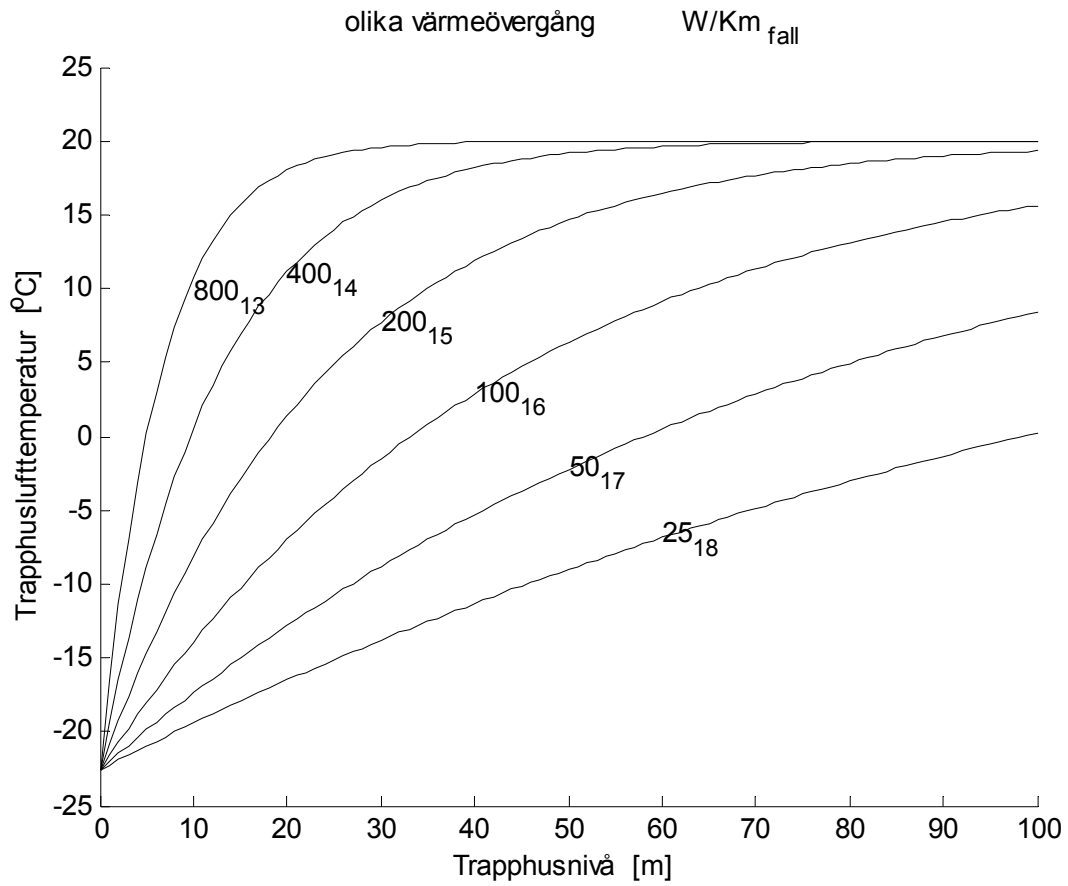
Figur 2.4 Flöde vid olika tryckfall enligt fall 7-12 i Tabell 2.1.



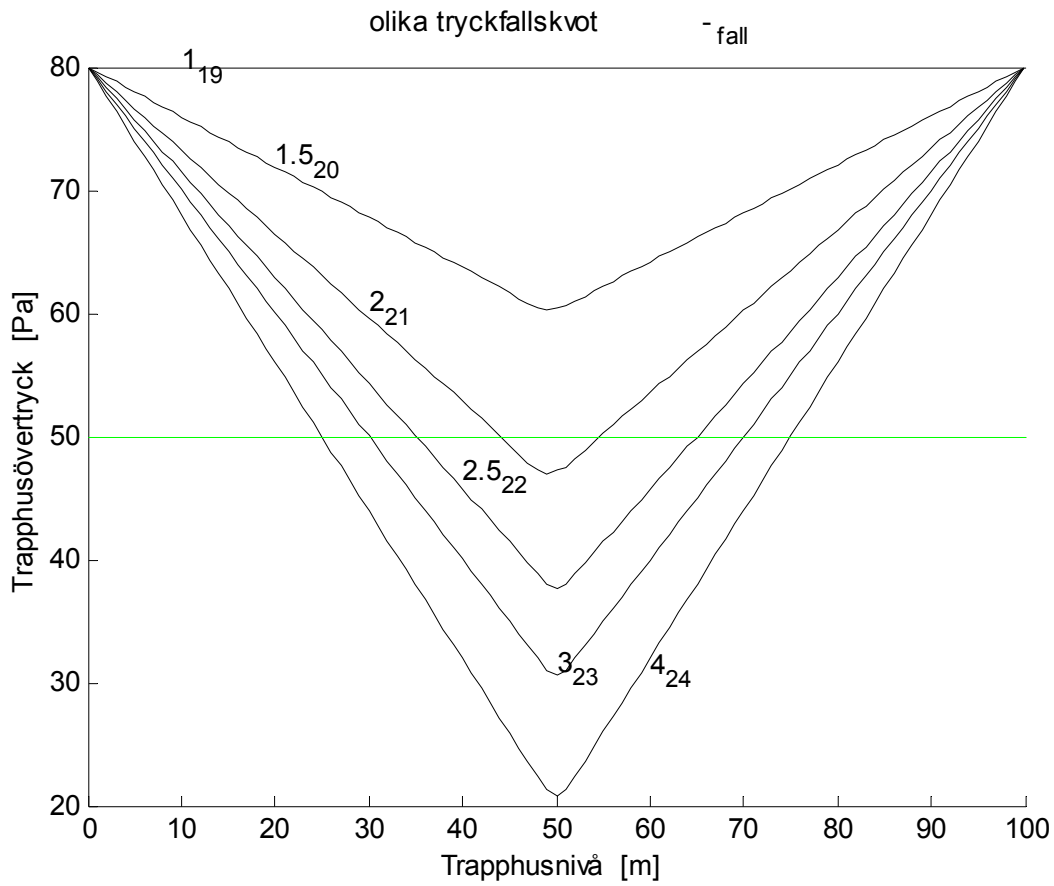
Figur 2.5 Övertryck vid olika värmeövergång enligt fall 13-18 i Tabell 2.1.



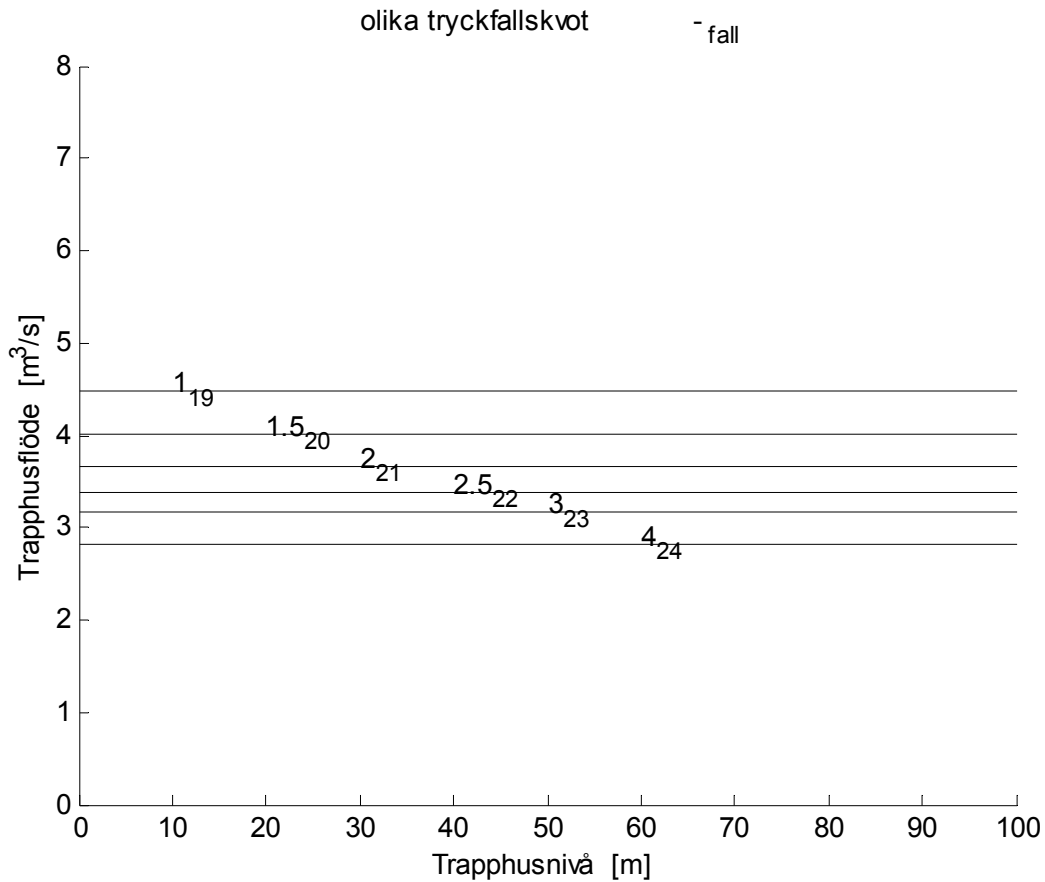
Figur 2.6 Flöde vid olika värmeövergång enligt fall 13-18 i Tabell 2.1.



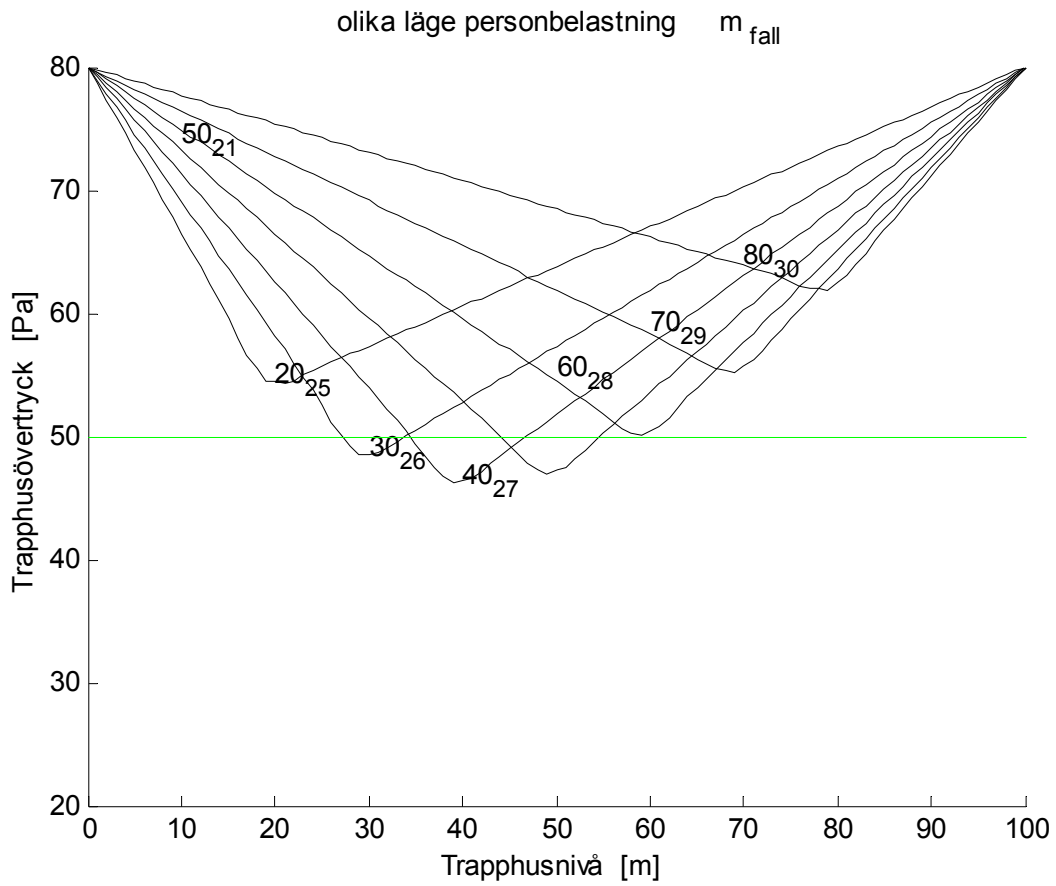
Figur 2.7 Temperatur vid olika värmeövergång enligt fall 13-18 i Tabell 2.1.



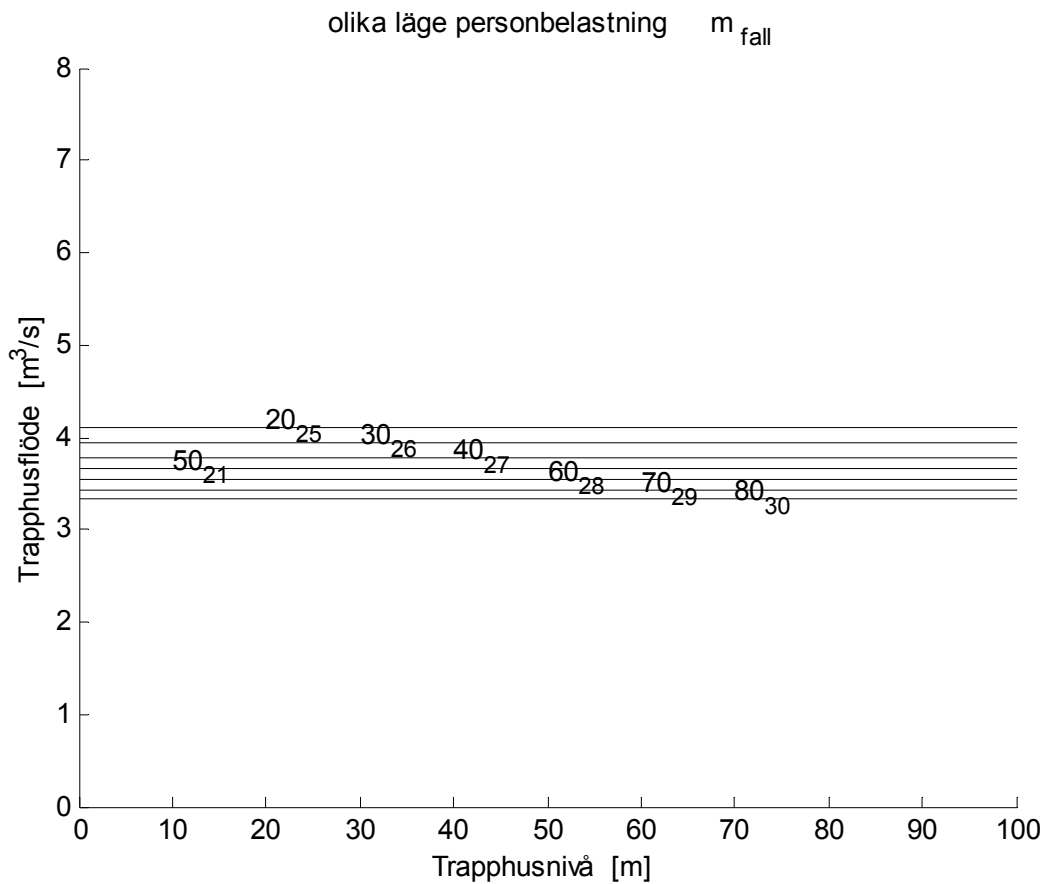
Figur 2.8 Övertryck vid olika tryckfallskvot enligt fall 19-24 i Tabell 2.1.



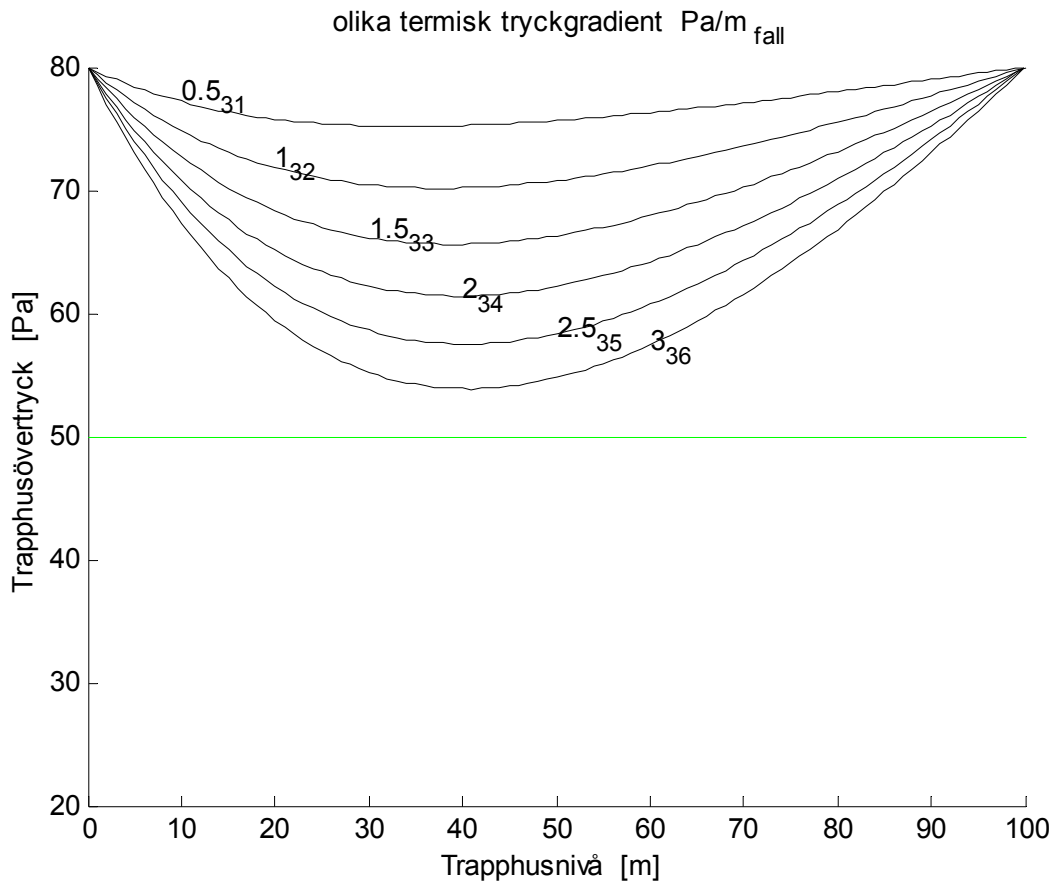
Figur 2.9 Flöde vid olika tryckfallskvot enligt fall 19-24 i Tabell 2.1.



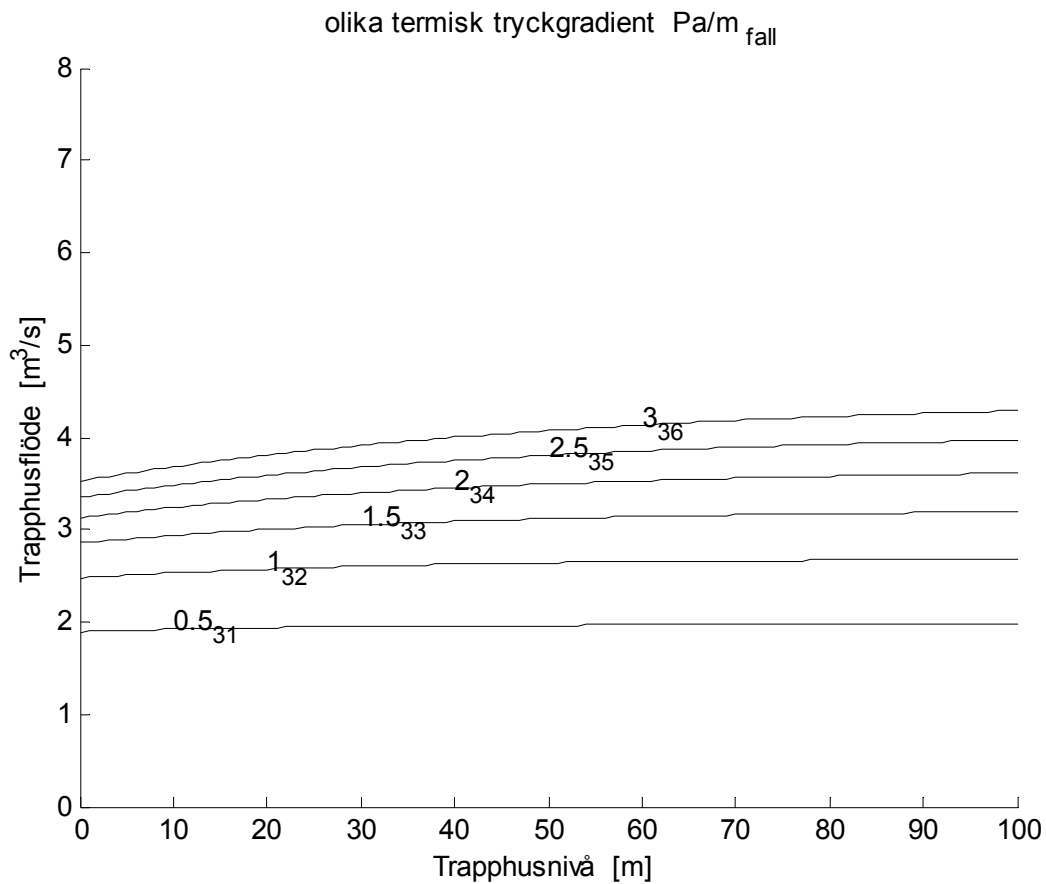
Figur 2.10 Övertryck vid olika läge för personbelastning enligt fall 21 och 25-30 i Tabell 2.1.



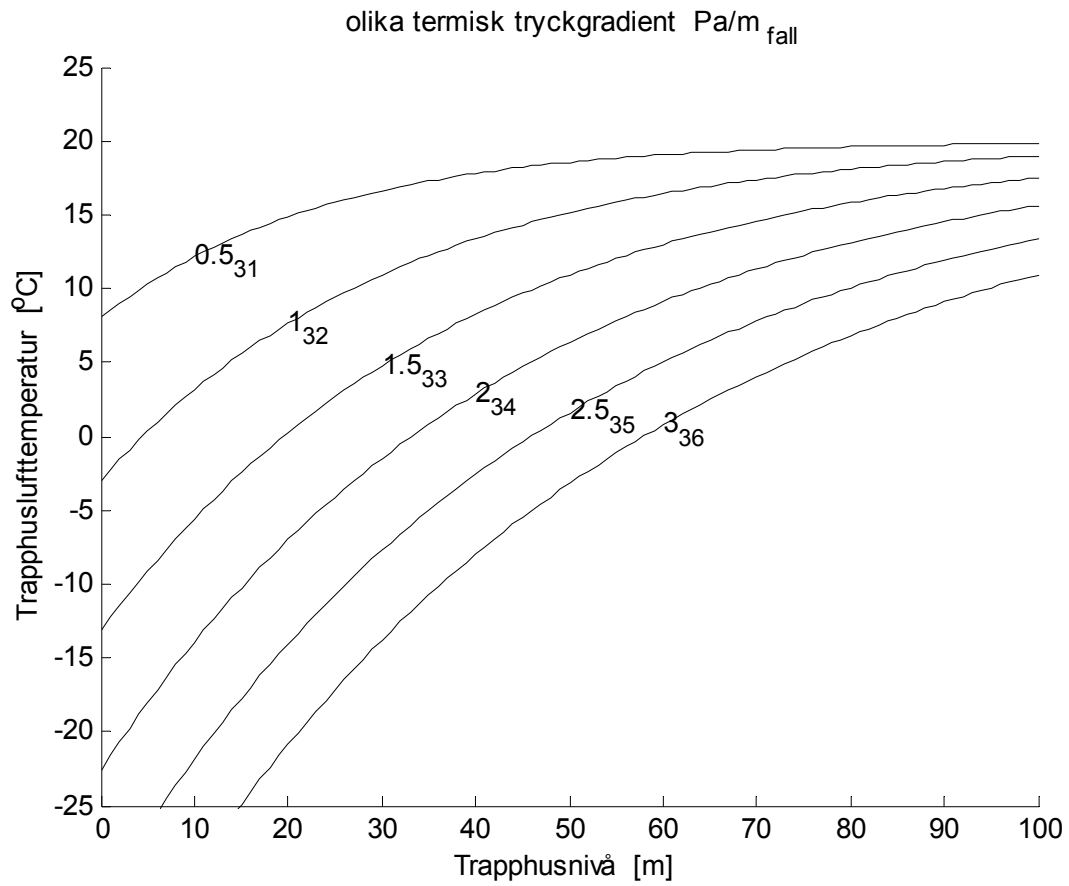
Figur 2.11 Flöde vid olika läge för personbelastning enligt fall 21 och 25-30 i Tabell 2.1.



Figur 2.12 Övertryck vid olika termisk tryckgradient enligt fall 31-36 i Tabell 2.1.



Figur 2.13 Övertryck vid olika termisk tryckgradient enligt fall 31-36 i Tabell 2.1.



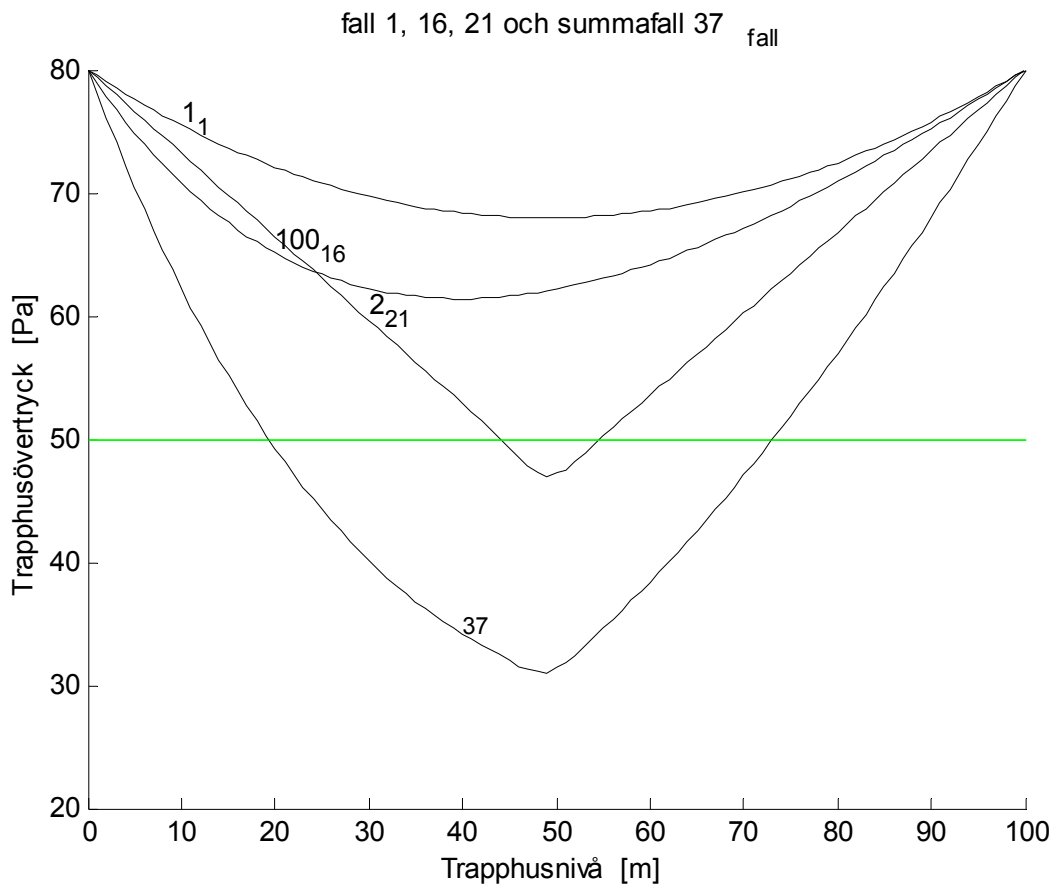
Figur 2.14 Temperatur vid olika termisk tryckgradient enligt fall 31-36 i Tabell 2.1.

Summafallet, fall 37, redovisas nedan i Figur 2.15 och har satts samman av fall 1 med nominellt läckflöde $1 \text{ m}^3/\text{s}$ vid 60 Pa , fall 16 med värmeövergångsförmågan 100 W/Km och fall 21 med personbelastning med i sin tur specifikt tryckfall 0.2 Pa/m $0\text{-}50 \text{ m}$ och 0.1 Pa/m för $50\text{-}100 \text{ m}$ både vid flödet $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

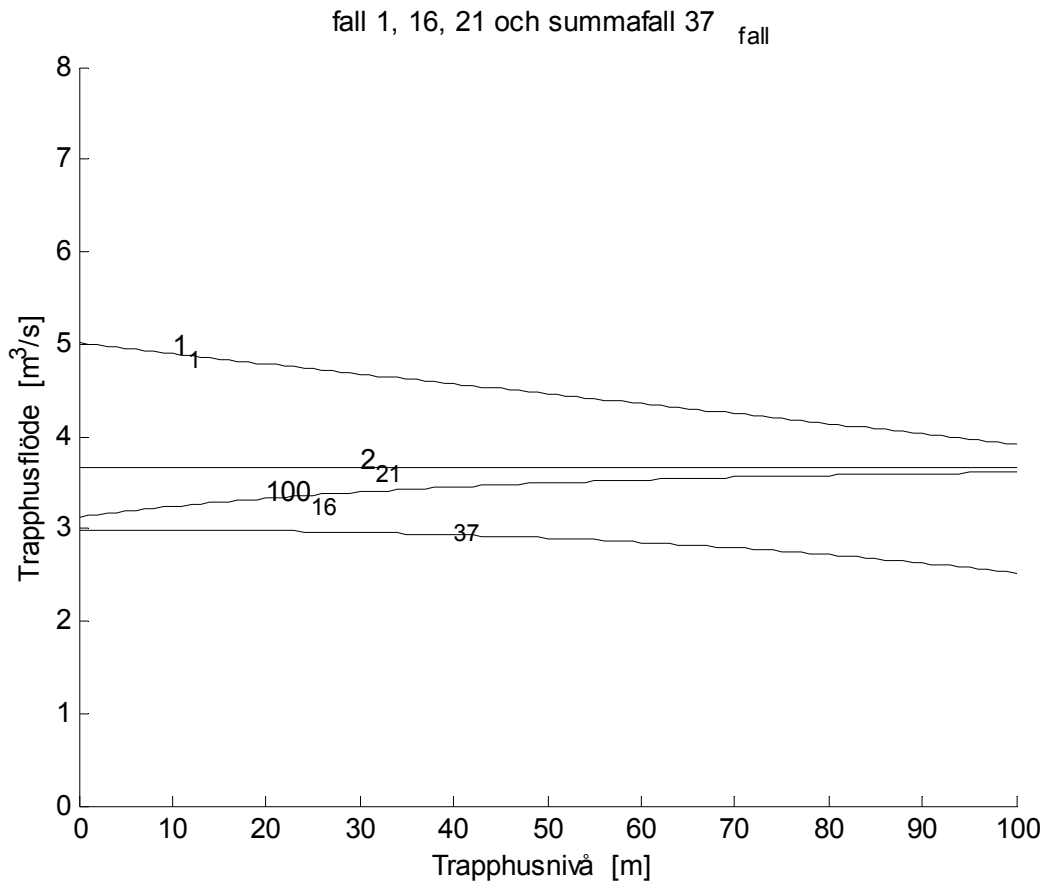
Lägsta övertryck för de tre delfallen 1, 16 och 21 är enligt Tabell 2.1 68.0 , 61.4 respektive 46.9 Pa . Övertryckets variation är 12.0 , 18.6 och 33.1 Pa för de tre delfallen, men sammantaget fås för fall 19 lägsta övertryck 31.0 Pa och variationen 49.0 Pa . Siffrorna visar att delfallens variation inte adderas, vilket är gynnsamt och vilket annars hade blivit 63.7 Pa och ett lägsta övertryck på 16.3 Pa under lägsta tillåtna övertryck på 20 Pa .

Det som också gör att delfallen inte kan adderas till ett summafall, är att inflödet och balansflödet är olika för de olika delfallen.

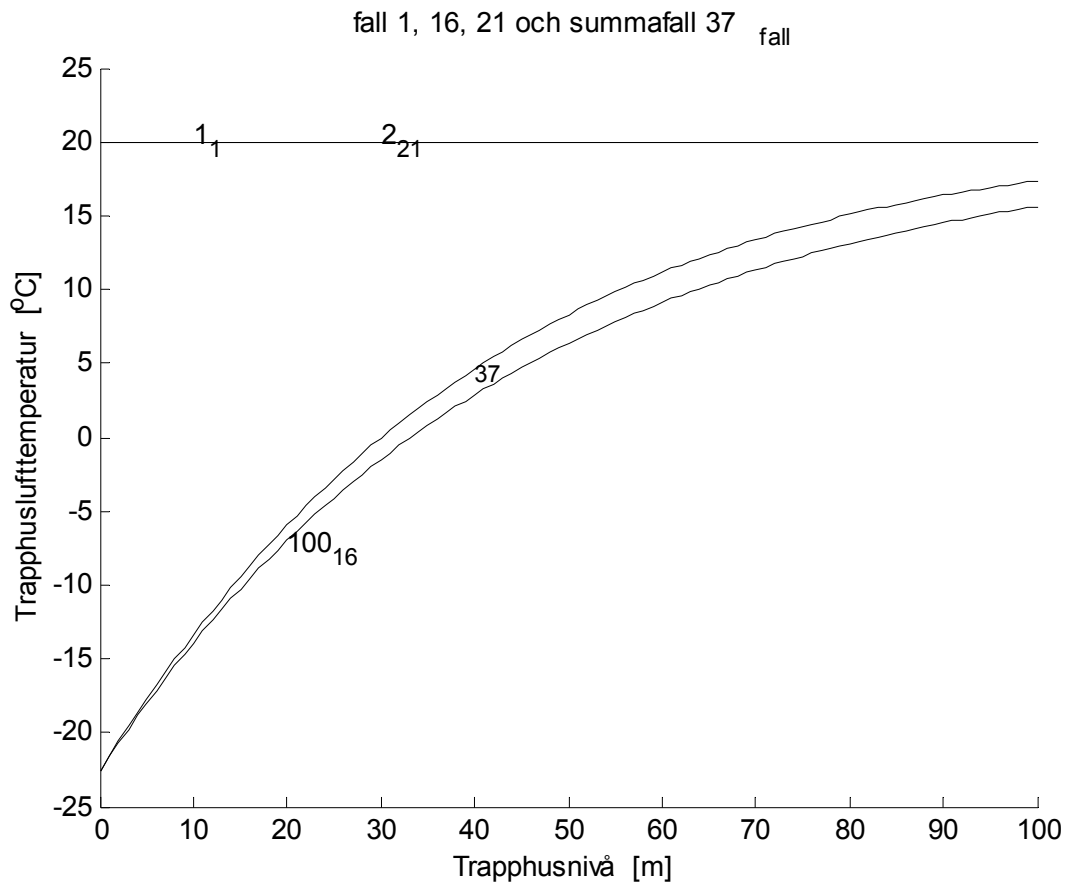
Slutsatsen är att faktorerna läckflöde, värmeöverföringsförmåga, när uteluft används som trycksättningsluft, och tryckfallets beroende av personbelastning bidrar alla till övertryckets variation för trycksättningsfallet med reglerad öppning överst och att ingen av dessa tre faktorer kan försummas. De redovisade fallen 1-37 i Tabell 2.1 och i Figur 2.1-17 visar att övertryckets variation beror på läckaget, tryckfallet/personbelastning, värmeöverföringsförmåga och utetemperatur. Det går med enkla modeller och förutsättningar att undersöka detta.



Figur 2.15 Övertryck för fall 1, 16, 21 och summafall 37 i Tabell 2.1.



Figur 2.16 Flöde för fall 1, 16, 21 och summafall 37 i Tabell 2.1.



Figur 2.17 Temperatur för fall 1, 16, 21 och summafall 37 i Tabell 2.1.

Enkel analys av övertryckets läckageberoende variation

Läckagets inverkan på övertryckets variation kan beräknas med antagande om att variationen är som störst halvvägs upp i trapphuset. Trapphusflödet antas vara konstant lika med medelflödet för den nedre och den övre halvan av trapphuset. Trapphusets flöde nederst och flöde överst kan skrivas som:

$$q(0) = q_b + q_x/2 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (2.4)$$

$$q(h) = q_b - q_x/2 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (2.5)$$

De två medelflödena för trapphusets nedre och övre halva kan i sin tur skrivas som:

$$q_n = q_b + q_x/4 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (2.6)$$

$$q_{\bar{o}} = q_b - q_x/4 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (2.7)$$

Det totala tryckfallet skall vara lika med den termiska tryckändringen $R_T h$ vilket efter förenkling kan skrivas som :

$$R_T h = Rh (q_n^2 + q_{\bar{o}}^2)/2 = Rh (q_b^2 + q_x^2/16) \quad (\text{Pa}) \quad (2.8)$$

Den antagna största variationen i tryckfall kan beräknas som tryckfallet för den nedre delen minskat med halva det totala tryckfallet enligt nedan:

$$dp_x = Rh q_n^2/2 - Rh (q_n^2 + q_{\bar{o}}^2)/4 = Rh (q_n^2 - q_{\bar{o}}^2)/4 \quad (\text{Pa}) \quad (2.9)$$

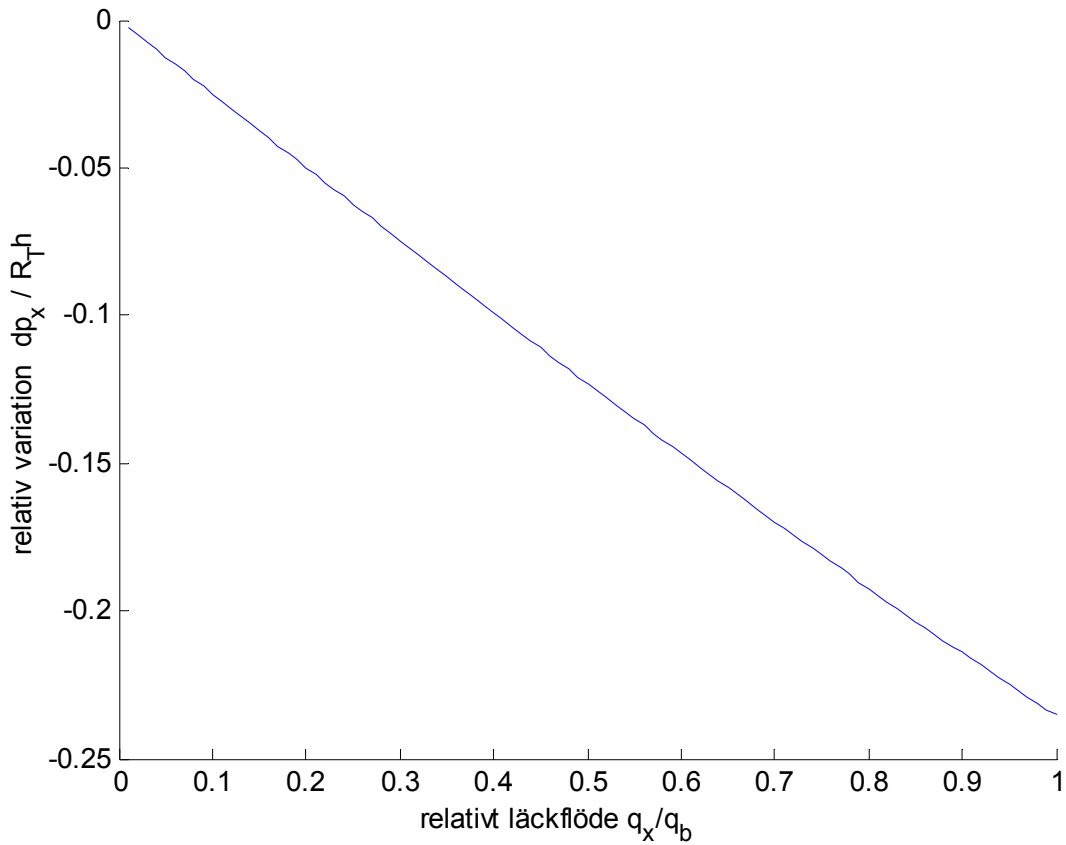
Utnyttjande av (2.6-8) efter insättning i (2.9) och införandet av läckflödeskvoten $q_{xb} = q_x/q_b$ ger följande:

$$dp_x = R_T h q_{xb} / 4(1 + q_{xb}^2/16) \quad (\text{Pa}) \quad (2.10)$$

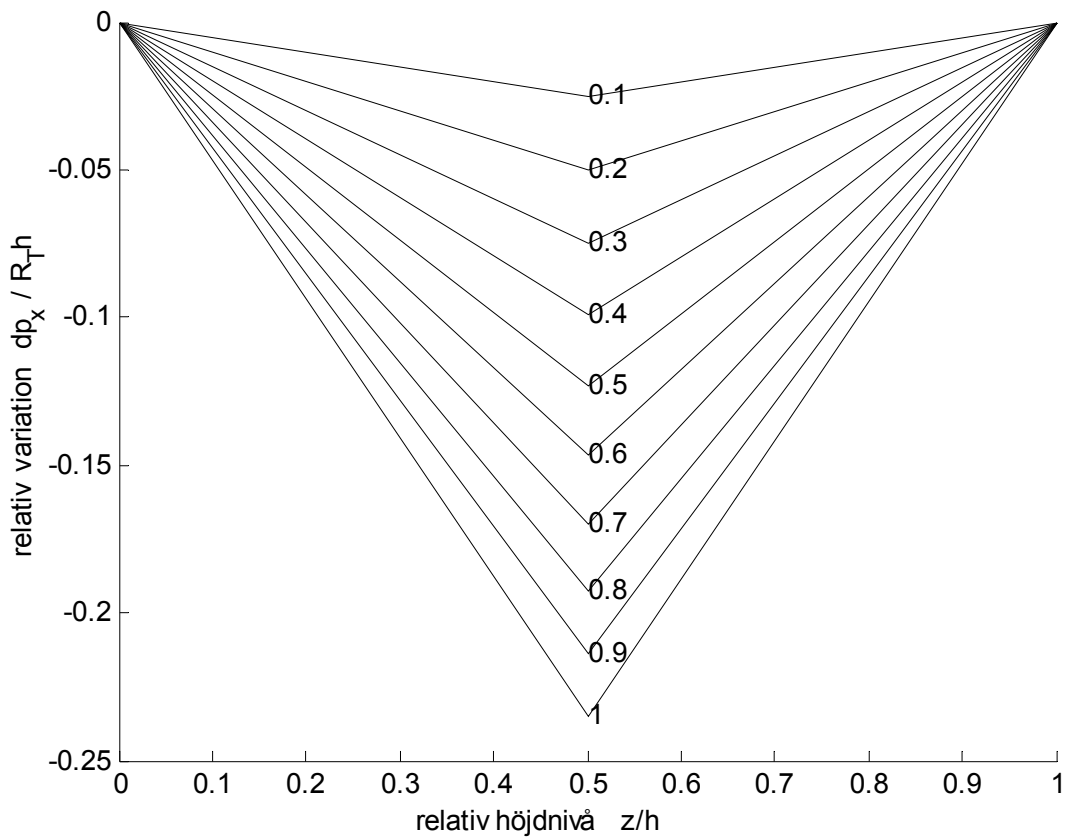
Uttrycket (2.10) redovisas i Figur 2.18 och kan förenklas genom att slopa den kvadratiska termen eftersom läckflödet q_x oftast är klart mindre än balansflödet q_b utan att noggrannheten försämras betydligt, vilket blir följande:

$$dp_x = R_T h q_{xb}/4 \quad (\text{Pa}) \quad (2.11)$$

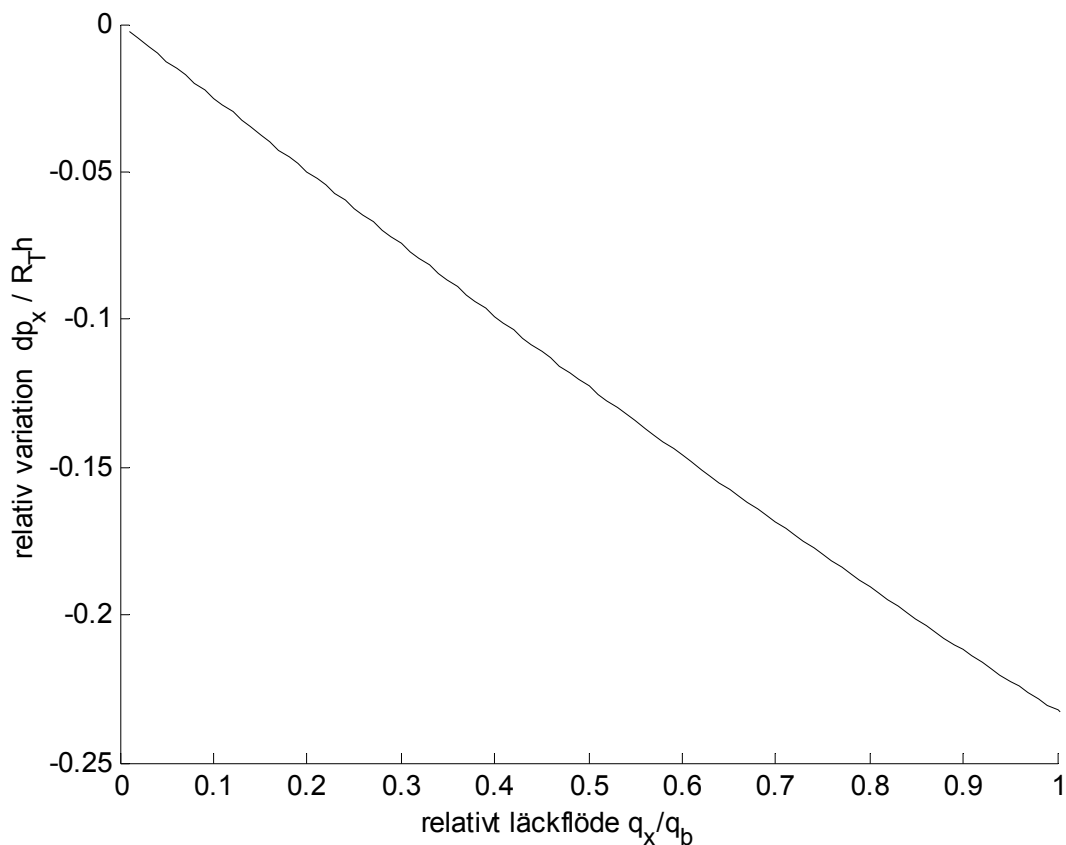
Denna enkla modell antar att trapphusflödet beskrivs med två medelflöden för var sin trapphusdel, vilket är en kraftig förenkling eftersom trapphusflödet i stort sett avtar linjärt med trapphushöjden. En analys av en modell med linjärt avtagande trapphusflöde ger en obetydligt mindre relativ variation som redovisas i Figur 2.20. Relativa övertrycksprofiler redovisas i Figur 2.21 för samma fall som i Figur 2.19 och de är mycket lika de för en fullständig modell enligt (2.1-3) jämfört med den enkla modellens kantiga övertrycksprofil i Figur 2.19. Kurvorna i Figur 2.21 visar också att den relativa trapphusnivån för den största variationen varierar något med läckflödeskvoten q_{xb} . Kvoterna 0, 1 och 2 ger lägena 0.5, 0.459 $(1.5 - (0.75 + 1/3)^{0.5})$ respektive 0.423 $(1 - (1/3)^{0.5})$.



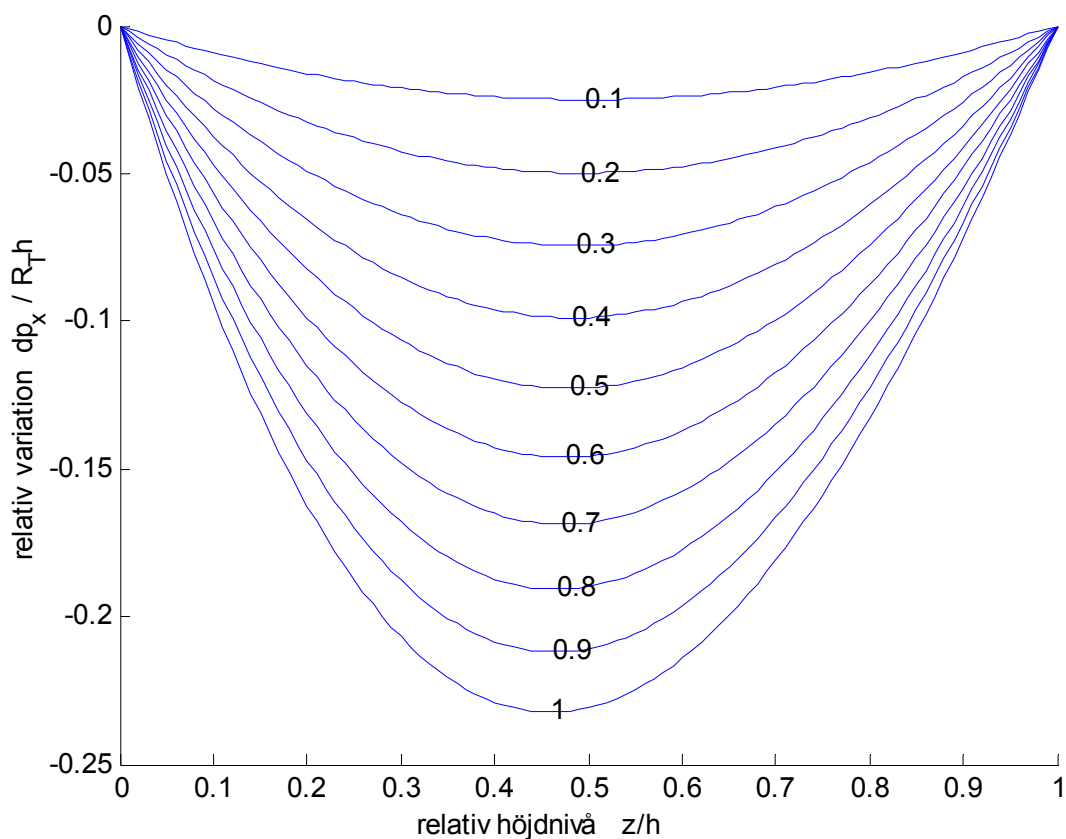
Figur 2.18 Relativ variation i övertryck som funktion av relativt läckflöde.



Figur 2.19 Relativ övertrycksprofil som funktion av relativ höjdnivå och relativt läckflöde.



Figur 2.20 Relativ variation i övertryck som funktion av relativt läckflöde.



Figur 2.21 Relativ övertrycksprofil som funktion av relativ höjdnivå och relativt läckflöde.

Enkel analys av övertryckets personlastberoende variation

En ojämn personbelastning kan ensam orsaka en stor variation i övertrycket. Antag att personbelastningen ökar tryckfallet R med en faktor f till fR och att personbelastningen är konstant under och över brytpunkten på den relativa höjden p . Tryckfallet för enbart personbelastning upp till den relativa höjden p kan för balansflödet q skrivas som:

$$\Delta p_p(z) = Rhq^2 f p \quad (\text{Pa}) \quad (2.12)$$

Tryckfallet för hela trapphuset ges av följande:

$$\Delta p_p(1) = Rhq^2 (f p + 1 - p) \quad (\text{Pa}) \quad (2.13)$$

Variationen i tryckfall för det relativa läget $z = p$ blir (2.12) minskat med p multiplicerat med (2.13) och kan efter förenkling skrivas som:

$$dp_p(p) = Rhq^2 p(1 - p)(f - 1) \quad (\text{Pa}) \quad (2.14)$$

Uttrycket ovan är som väntat noll för ändlägena $p = 0$ och $p = 1$ och konstant tryckfall $f = 1$.

Det går inte att avgöra hur stor variationen blir med (2.14), eftersom balansflödet q i (2.12-2.14) påverkas av personbelastningen. Den totala termiska tryckändringen $R_T h$ är lika med det totala tryckfallet enligt (2.13). Detta ger att $R_T = Rq^2$ och (2.14) kan skrivas om till följande uttryck för övertryckets variation för det relativa läget $z = p$:

$$dp_p(p) = R_T h p(1 - p)(f - 1) / (f p + 1 - p) \quad (\text{Pa}) \quad (2.15)$$

Om brytpunkten för personbelastningen ligger på halva trapphushöjden $p = 0.5$ fås följande uttryck efter förenkling:

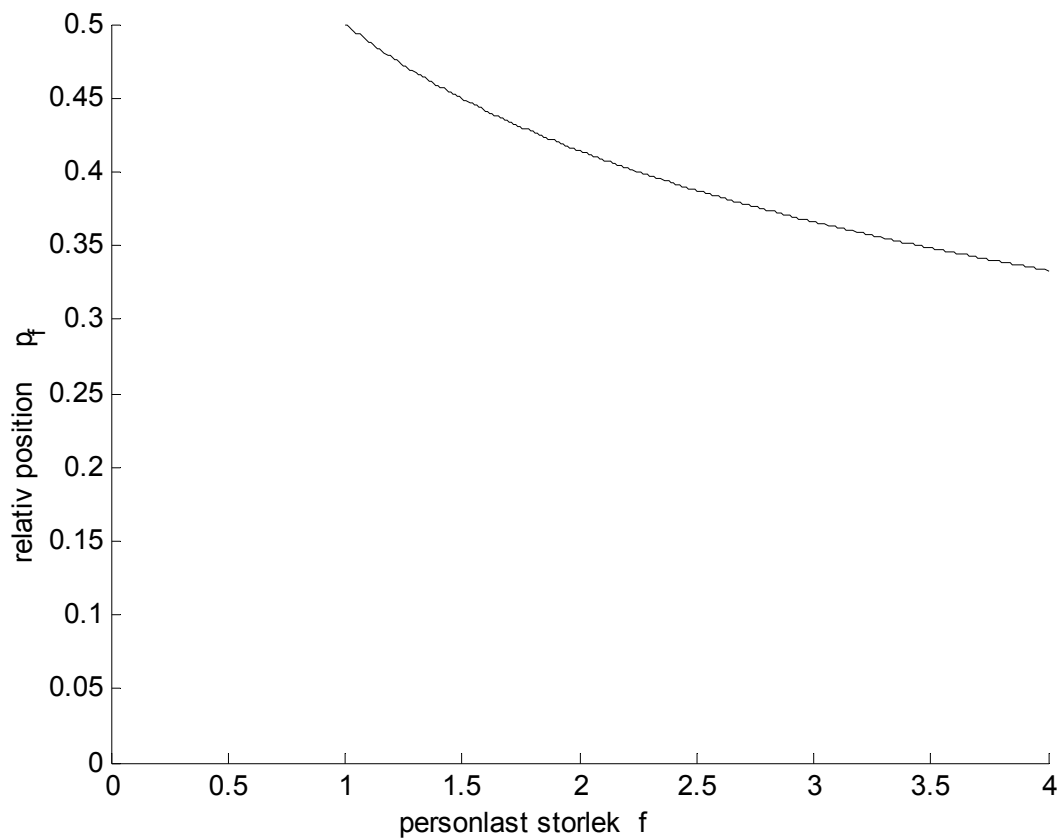
$$dp_p(0.5) = R_T h (f - 1) / 2(f + 1) \quad (\text{Pa}) \quad (2.16)$$

Det brytpunktsläge p som ger den största variationen i övertryck för en given storlek på personbelastningen kan bestämmas genom att derivera (2.15) med avseende på parametern p , vilket ger sökt brytpunktsläge och motsvarande största variation i övertryck:

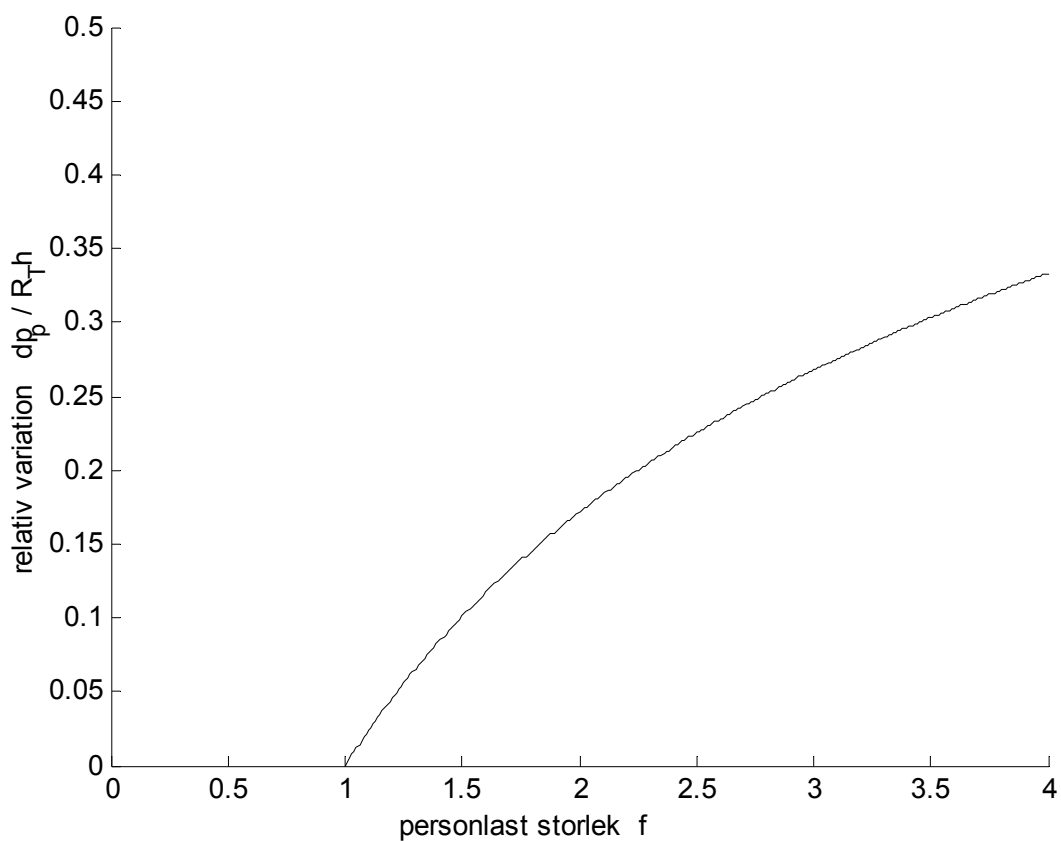
$$p_f = 1 / (f^{0.5} + 1) \quad (-) \quad (2.17)$$

$$dp_p(p_f) = R_T h (f^{0.5} - 1) / (f^{0.5} + 1) \quad (\text{Pa}) \quad (2.18)$$

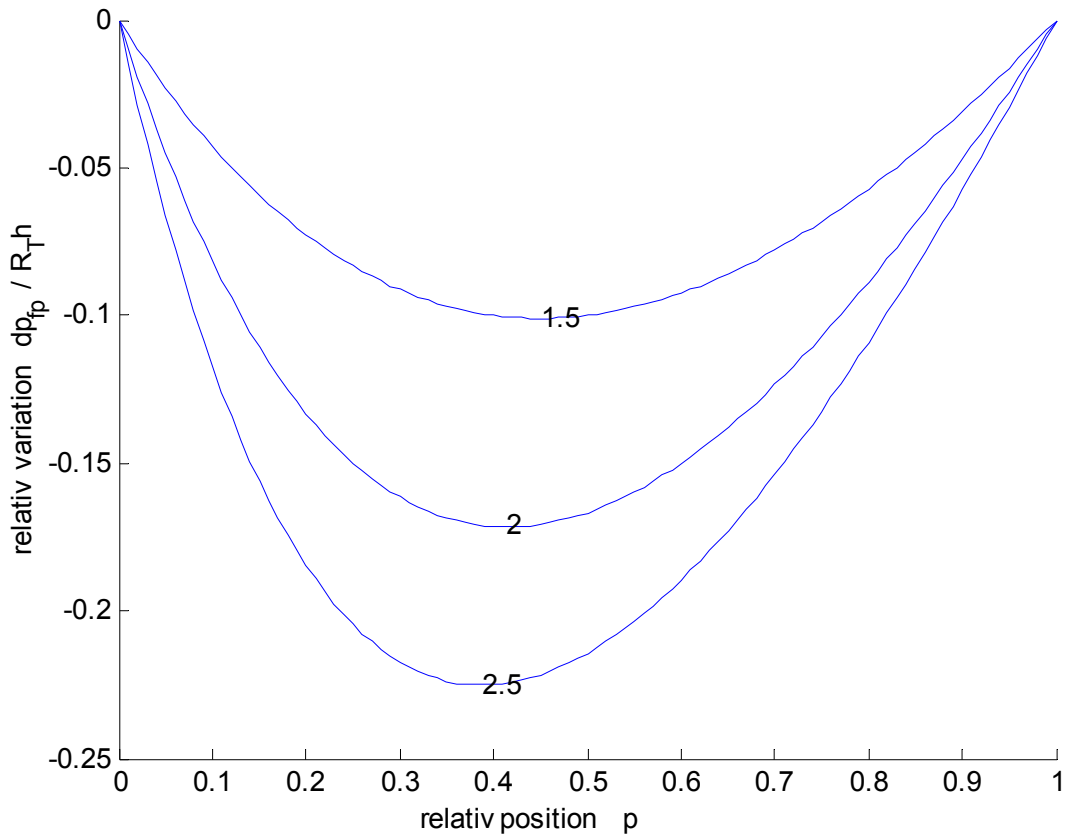
De två uttrycken (2.17-18) redovisas i Figur 2.22 och 2.23. Det relativa läget för den största variationen (2.17) ändras något med lastfaktorn f och den största variationen i övertryck (2.18) kan bli betydande. Ett extremt värde $f = 4$ ger det relativa läget $1/3$ och dito variation $R_T h/3$ och ett rimligare värde $f = 2.25$ ger 0.4 respektive $R_T h/5$. Den relativa variationen redovisas som funktion av den relativa positionen p och för olika storleksfaktor f i Figur 2.24. Exempel på relativa övertrycksprofiler redovisas i Figur 2.25.



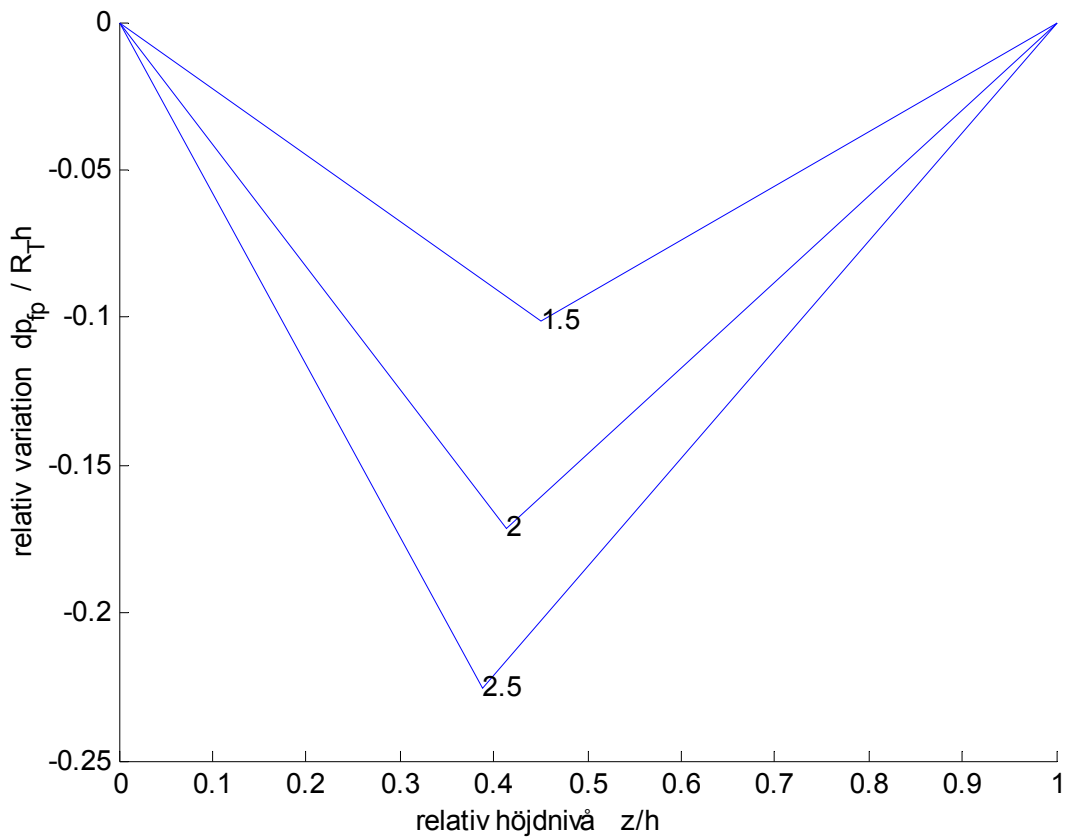
Figur 2.22 Relativ position för största övertrycksvariation som funktion av lastfaktor f .



Figur 2.23 Relativ största övertrycksvariation som funktion av lastfaktor f .



Figur 2.24 Relativ variation i övertryck som funktion av position p och olika storlek f .



Figur 2.25 Relativ övertrycksprofil som funktion av relativ höjd och för olika storlek f .

Enkel analys av övertryckets temperaturberoende variation

Övertryckets variation skall här beskrivas med två enkla modeller. Trapphusluftens temperatur närmar sig trapphusets yttemperatur alltmer ju högre upp i trapphuset luften kommer. Det som bestämmer trapphusluftens temperaturkurva är kvoten mellan luftflödets värmeöverföringsförmåga $\rho c q$ (W/K) och trapphusets specifika värmeöverföringsförmåga per höjdmeter Ah (W/Km). Kvoten $\rho c q / Ah$ (m) anger den höjdskillnad uppåt med den rådande temperaturändring för trapphusluften (kurvtangent) som trapphusluften ser ut att bli lika med yttemperaturen. Denna karaktéristiska höjdskillnad betecknas h_b och kan användas för att förenklat beskriva trapphusluftens temperatur med två olika modeller som båda ger nästan rätt medeltemperatur för trapphusluften.

Den ena modellen bygger på att trapphusluften är lika med utetemperaturen upp till nivån h_b och däröver lika med yttemperaturen upp till nivån h . Detta innebär att trapphusluftens densitet är lika med ρ_o upptill brythöjden h_b och däröver lika med ρ_s . Hur övertrycket i trapphuset $p(z)$ ändras mellan de tre nivåerna 0 , h_b och h skrivs som:

$$p(h_b) - p(0) = -a h_b / \rho_o \quad (\text{Pa}) \quad (2.19)$$

$$p(h) - p(h_b) = -a (h - h_b) / \rho_s + (h - h_b)(\rho_o - \rho_s)g \quad (\text{Pa}) \quad (2.20)$$

Det första termen i högerledet anger strömningstryckfall och den andra termisk tryckändring.

Trycksättning sker till samma start- och sluttryck vilket ger sambandet:

$$p(h) = p(0) \quad (\text{Pa}) \quad (2.21)$$

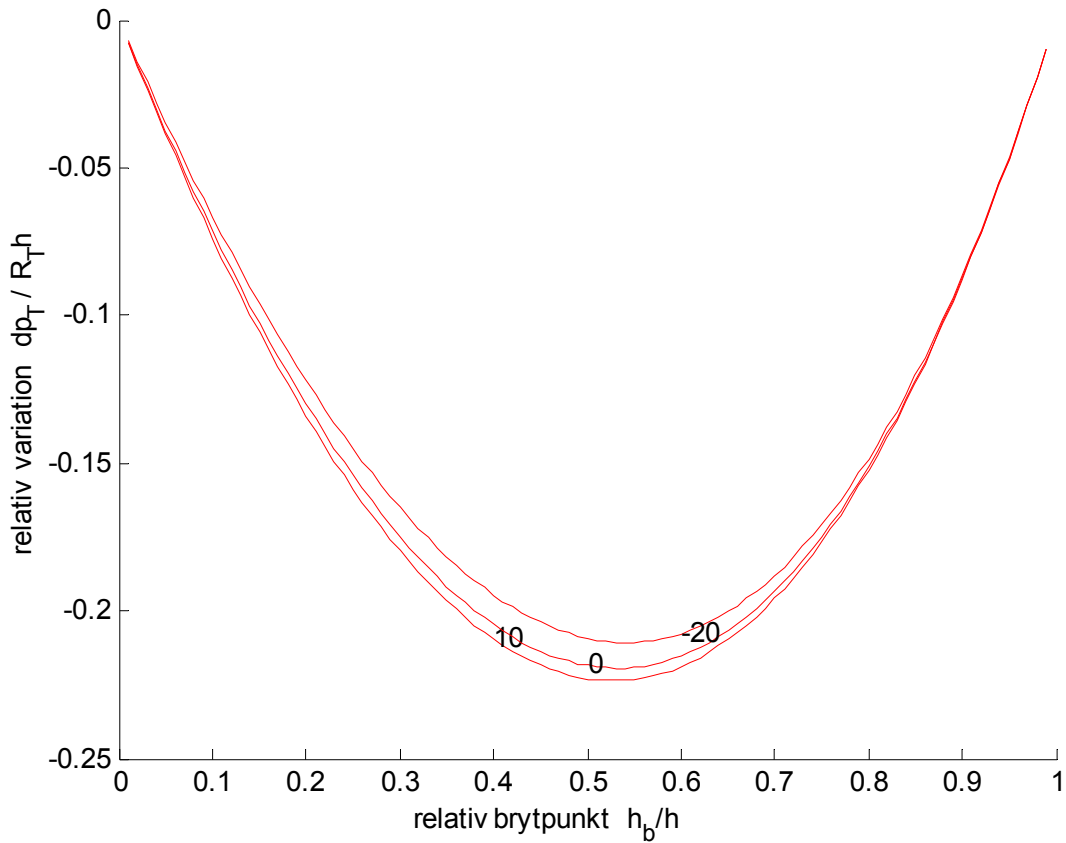
Variationen i övertryck som ges av (2.19) kan efter eliminering av parametern a och förenkling skrivas som:

$$p(h_b) - p(0) = -((h - h_b)(\rho_o - \rho_s)gh_b) / (h_b + (h - h_b)\rho_o / \rho_s) \quad (\text{Pa}) \quad (2.22)$$

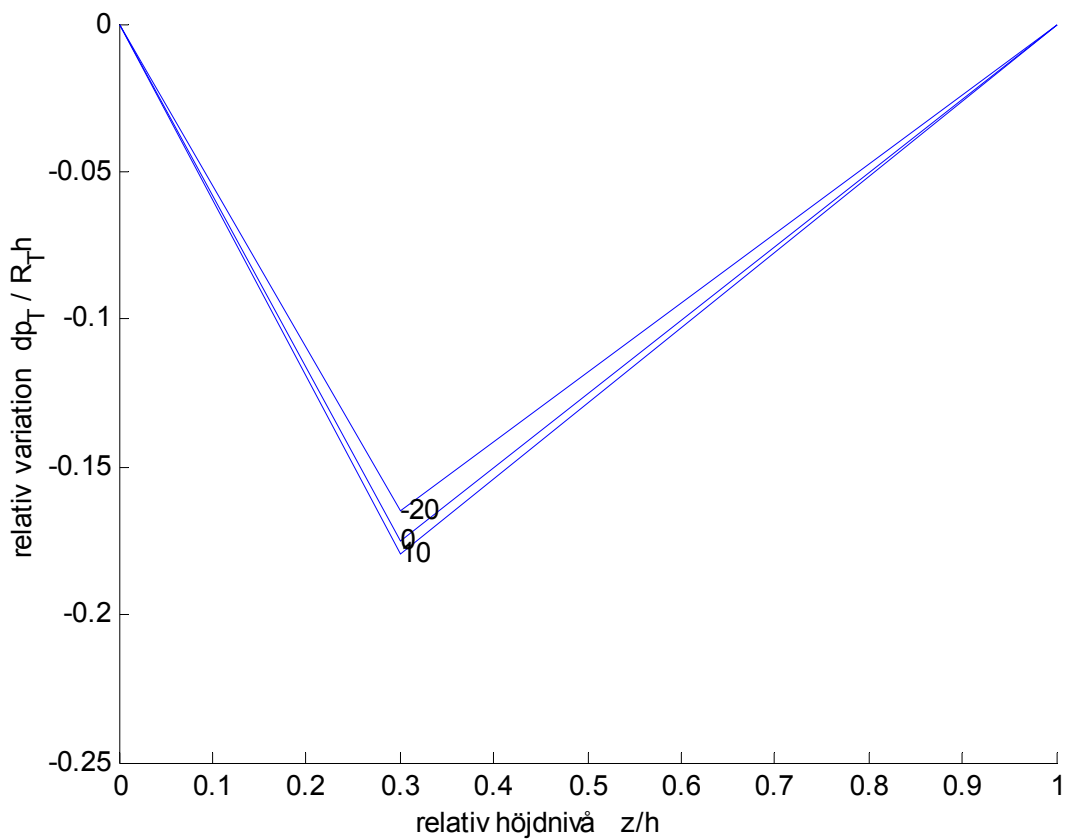
Variationen i övertryck enligt (2.22) kan också jämföras med den termiska tryckändringen för hela trapphusets längd $R_T h$, som är lika med $(\rho_o - \rho_s)gh$. Variation i övertryck vid nivå h_b kan därför skrivas som den total termiska tryckändringen $R_T h$ multiplicerad med en korrektion enligt nedan där h_{bh} står för den relativa brytpunkten h_b/h :

$$dp_T(h_b) = -R_T h (1 - h_{bh}) h_{bh} / (h_{bh} + (1 - h_{bh})\rho_o / \rho_s) \quad (-) \quad (2.23)$$

Den relativa variationen enligt (2.23) redovisas i Figur 2.26 som funktion av den relativa brytpunkten h_{bh} eller flödeskvoten h_b/h och utetemperaturerna 10, 0 och -20 °C. Exempel på motsvarande relativa övertrycksprofiler för denna enkla modell redovisas i Figur 2.27 för utetemperaturerna 10, 0 och -20 °C.



Figur 2.26 Relativ variation i övertryck som funktion av relativ brytpunkt och olika utetemperatur.



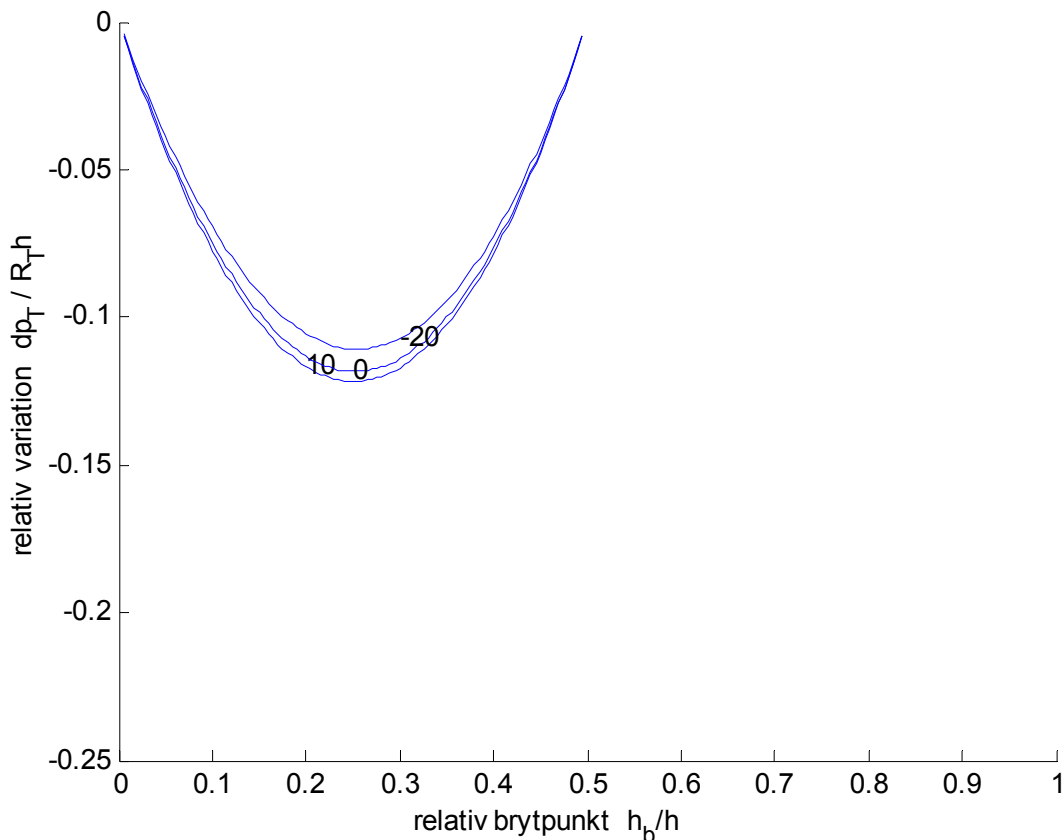
Figur 2.27 Relativ övertryckprofil som funktion av relativ höjd och olika utetemperatur.

Den andra modellen bygger på att trapphusluftens temperatur är lika med medeltemperaturen för utetemperatur och yttemperatur upp till nivån h_m lika med $2h_b$ och däröver lika med yttemperaturen upp till nivån h . Detta innebär att trapphusluftens densitet är nästan lika med medeldensiteten $\rho_m = (\rho_o + \rho_s)/2$ upptill dubbla brythöjden $h_m = 2h_b$ och däröver lika med ρ_s . Hur övertrycket i trapphuset $p(z)$ ändras mellan de tre nivåerna 0 , h_m och h skrivs som:

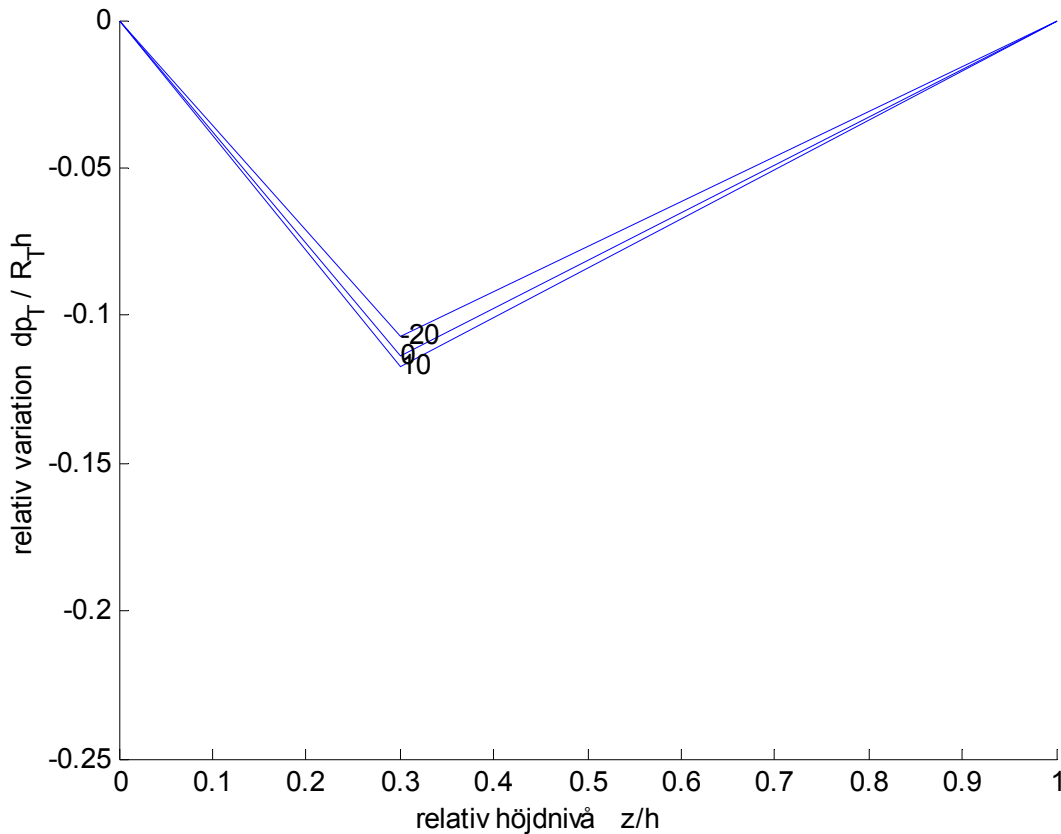
$$p(h_m) - p(0) = -a h_m/\rho_m + h_m(\rho_o - \rho_m)g \quad (\text{Pa}) \quad (2.24)$$

$$p(h) - p(h_m) = -a (h-h_m)/\rho_s + (h-h_m)(\rho_o - \rho_s)g \quad (\text{Pa}) \quad (2.25)$$

Förstatermerna i högerledet anger strömningstryckfall och andratermerna termisk tryckändring. Trycksättning sker till samma starttryck och sluttryck som tidigare enligt (2.21). Variationen i övertryck som ges av (2.24) kan efter eliminering av parametern a beräknas som för den tidigare modellen. Den relativa variationen för denna modell redovisas i Figur 2.28 som funktion av kvoten h_b/h och för utetemperaturerna 10, 0 och -20 °C. En relativ brytpunkt lika med 0.5 ger ingen variation eftersom luften i hela trapphuset antas ha samma temperatur och densitet. Jämförelse mellan kurvorna i Figur 2.26 och 2.28 visar på måttliga skillnader för relativa brythöjder mindre än 0.2. Den första modellen bör inte användas över denna brythöjd och den andra inte över brythöjden 0.4. Exempel på motsvarande relativa övertrycksprofiler för denna enkla modell redovisas i Figur 2.29 för utetemperaturerna 10, 0 och -20 °C.



Figur 2.28 Relativ variation i övertryck som funktion av relativ brytpunkt och olika utetemperatur.



Figur 2.29 Relativ övertryckprofil som funktion av relativ höjd och olika utetemperatur.

Enkel analys av övertryckets temperaturoberoende variation

De tidigare beräkningsuttrycken för enbart läckagets och enbart personbelastningens inverkan på övertryckets variation kan utnyttjas för få ett beräkningsuttryck för samtidig inverkan av läckage och personbelastning. Trapphusflödet antas vara konstant lika med medelflödet för den nedre delen med personbelastning och den övre delen utan personbelastning. De två medelflödena för trapphusets nedre del och övre del kan skrivas som:

$$q_n = q_b + (1-p)q_x/2 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (2.26)$$

$$q_o = q_b - pq_x/2 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (2.27)$$

Det totala tryckfallet skall vara lika med den termiska tryckändringen $R_T h$ vilket efter förenkling kan skrivas som :

$$R_T h = Rh (pfq_n^2 + (1-p)q_o^2) \quad (\text{Pa}) \quad (2.28)$$

Den antagna största variationen i tryckfall kan beräknas som tryckfallet för den nedre delen minskat med motsvarande andel av det totala tryckfallet enligt nedan:

$$dp_{px} = Rh p(1-p)(f q_n^2 - q_o^2) \quad (\text{Pa}) \quad (2.29)$$

Eliminering av parametern R med utnyttjande av (2.28) ger efter insättning i (2.29) följande:

$$dp_{px} = R_T h p(1-p)(f q_n^2 - q_\delta^2)/(pf q_n^2 + (1-p)q_\delta^2) \quad (\text{Pa}) \quad (2.30)$$

Uttrycket (2.30) kan skrivas om något genom att införa en korrigerad parameter f_x enligt följande samband:

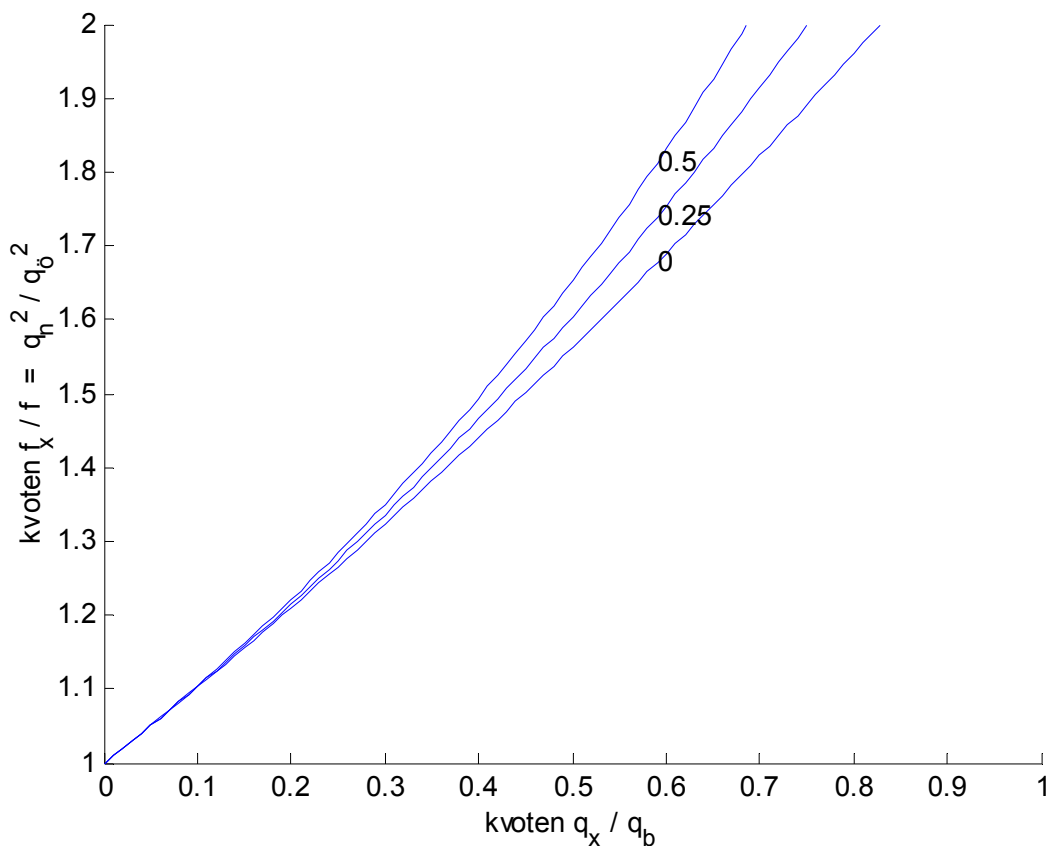
$$f_x = f q_n^2 / q_\delta^2 \quad (-) \quad (2.31)$$

$$dp_{px} = R_T h p(1-p)(f_x - 1)/(pf_x + 1 - p) \quad (\text{Pa}) \quad (2.32)$$

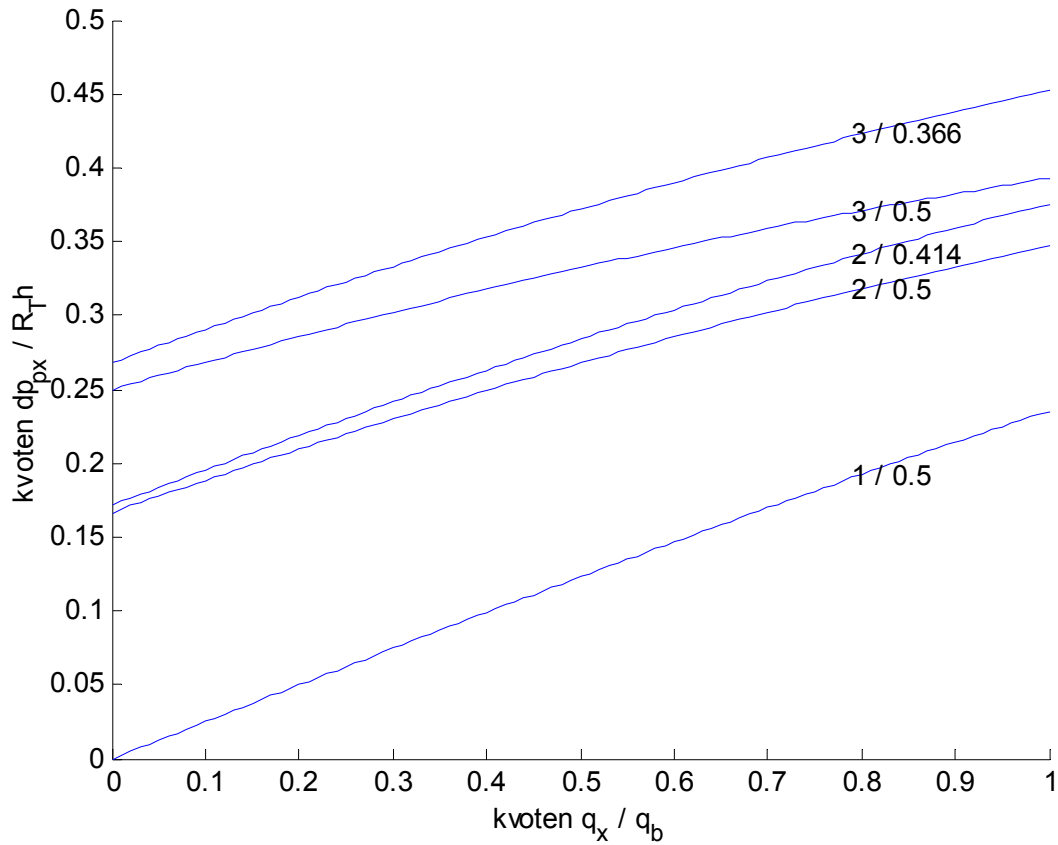
Uttrycket (2.32) kan förenklas för särfallet $p=0.5$ till följande:

$$dp_{px} = R_T h (f_x - 1)/2(f_x + 1) \quad (\text{Pa}) \quad (2.33)$$

Uttrycket (2.33) är identiskt med (2.16) bortsett från att parametern f ersätts med den korrigerade parametern f_x . Hur korrigeringen blir redovisas i Figur 2.28 som funktion av den relativa läckflödeskvoten q_x/q_b och för olika personbelastningslägen p 0.0, 0.25 och 0.5.



Figur 2.28 Korrektionsfaktor för tryckfallsfaktor som funktion av relativt läckflöde och för olika relativt personbelastningsläge $p = 0, 0.25$ och 0.5 .



Figur 2.29 Relativt variation i övertryck som funktion av relativt läckflöde och för olika tryckfallsfaktor $f=1, 2$ och 3 kombinerat med relativt läge $p=0.5$ och det läge som ger störst variation enligt (2.17).

Jämförelse med exakt beräkning

Metoderna för att uppskatta variationen i övertryck kan jämföras med olika fall i Tabell 2.1.

Fall 1 i Tabell 2.1 har ett lägsta övertryck på 68 Pa för ett nominellt läckflöde på 1 m³/s vid 60 Pa. Inflöde och utflöde är 5.01 m³/s respektive 3.91 m³/s. Balansflödet kan uppskattas till 4.46 m³/s och läckflödet till 1.10 m³/s. Det högre läckflödet kan förklaras med att trycket är högre än 60 Pa snarare omkring 75 Pa, vilket ger en korrektionsfaktor på 1.12 (75/60)^{0.5}. Det relativa läckflödet q_x/q_b kan beräknas till 0.22, vilket ger en relativ variation på 0.05 och för den totala termiska tryckändringen R_{Th} på 200 Pa blir den uppskattade variation 10 Pa jämfört med 12 Pa enligt exakt beräkning. Slutsatsen är att övertrycksvariationens läckageberoende kan skattas med rimligt noggrannhet enligt (2.11) om flödena är kända.

Fall 21 med personbelastning har ett lägsta övertryck på 46.9 Pa för dubblerat tryckfall för nedre halvan av trapphuset. Den relativa variationen kan beräknas exakt med (2.16) till $R_{Th}/6$ och med samma termiska tryckändring R_{Th} på 200 Pa fås 33.3 Pa att jämföra med simulerad på 33.1 Pa. Skillnaden beror på att övergång i personbelastning sker i det simulerade fall 21 från 49 till 51 m och inte exakt vid 50 m. Detta ger en något mindre variation. Slutsatsen är att den renodlade personbelastningens inverkan på övertryckets variation kan beräknas exakt.

Fall 16 med uteluft och den specifika värmeöverföringsförmågan 100 W/Km har ett lägsta övertryck på 61.4 Pa. Trapphusflödets värmetransportförmåga kan beräknas till 4400 W/K. Detta ger en brythöjd h_b på 44 m. Den relativa variationen kan med Figur 2.24 och 2.26 uppskattas till 0.20 respektive 0.05, vilket ger 40 respektive 10 Pa över och under facit på 18.6 Pa. Fall 13-16 med värmeöverföringsförmågan 800, 400, 200 och 100 W/Km har en relativ brythöjd på 0.065, 0.127, 0.241 och 0.440 och en variation på 8, 12, 17 och 18 Pa. Den första uppskattningen enligt (2.23) ger 9, 17, 28 och 40 Pa och den andra ger 10, 16, 22 och 10 Pa. Slutsatsen är att den andra metoden kan användas för lägre värden på den relativa brythöjden.

De här redovisade beräkningsuttrycken för olika parametrars inverkan på den begränsade övertrycksvariationen kan givetvis användas för att göra en enkel kontroll om läckaget är för stort med (2.11), om personbelastningen är för stort med (2.18) eller om läckage och personbelastning sammantaget är för stort med (2.33) och om trycksättning med uteluft leder till för stor variation i övertryck enligt (2.23).

Analysen visar också att den sammanlagda variationen för delfallen är större än den för ett motsvarande summafäll. Delfallens variation kan därför användas för att överskatta variationen i övertryck.

3 Dimensioneringsuttryck

Syftet med detta avsnitt är att ge ett beräkningsuttryck för att kunna avgöra om ett trapphus kan trycksättas inom ett begränsat övertrycksintervall. En enkel metod är att beräkna lägsta övertryck för ett fall med samma högsta övertryck nederst och överst i trapphuset.

Ett stort antal testfall har simulerats fram genom att beräkna alla kombinationer mellan fyra värden för följande sju parametrar värmeöverföringsförmåga W/Km, relativ tryckfallsändring vid personbelastning -, relativt läge för personbelastning -, trapphushöjd m, trapphusets högsta övertryck Pa, läckflöde m³/sm och utetemperatur °C. Trapphustemperaturen antas vara 20 °C. De använda parametervärdena redovisas i Tabell 3.1.

Tabell 3.1 Parametervärden för kontroll av dimensioneringsuttryck

parameter	symbol	sort	värde ₁	värde ₂	värde ₃	värde ₄
värmeöverföringsförmåga	Ah	W/Km	50	100	150	200
personbelastning relativ storlek	f	-	1.0	1.5	2.0	2.5
personbelastning relativt läge	p	-	0.3	0.4	0.5	0.5
höjd	h	m	40	80	120	160
högsta övertryck	p_{max}	Pa	50	60	70	80
nominellt läckflöde vid 50 Pa	q_m	m ³ /sm	0.005	0.010	0.015	0.20
utetemperatur	T_o	°C	0	-10	-20	-30

Fyra värden för sju parametrar ger totalt 16384 ($=4^7=2^{14}$) fall och av dessa har några uteslutits på grund av att beräknat sluttryck avviker från önskat värde.

Det som begränsar den möjliga trapphushöjden är variationen i övertrycket som kan bli större än det tillåtna övertrycksintervallet. Variationen i övertrycket kan beräknas med ett beräkningsuttryck (3.4) som tar hänsyn till läckage och personbelastning och ett annat uttryck (3.11) som tar hänsyn till att trapphustemperaturen varierar. Lägsta övertryck beräknas iterativt med en enkel relaxation, givet högsta övertryck och de två variationerna i övertryck enligt (3.4) och (3.11).

Läckflödet q_x skattas med ett i sin tur skattat medelövertryck p_m . Det går att visa att medelövertrycket p_m skall beräknas som en viktning mellan högsta övertryck p_{max} och lägsta övertryck p_{min} med faktorerna 0.25 respektive 0.75 grundat på att övertryckskurvan är av tredje graden mellan minimat vid p_{min} och p_{max} . Kontrollberäkningar visade dock att om medelövertryck p_m sattes lika med lägsta övertryck p_{min} erhöles minsta medelfel i beräkningar av lägsta övertryck.

De beräkningsuttryck (3.1-12) som skall itereras redovisas nedan. Först skattas läckageflödet q_x med (3.1), därefter medeltemperaturgradienten R_t med (3.2) och trapphusluftens medeldensitet ρ_a och sedan balansflödet q_b med (3.3).

$$q_x = (p_{min}/p_x)^{0.5} q_m h \quad p_{min} > 0 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3.1)$$

$$R_t = (\rho_o - \rho_a) g h \quad (\text{Pa}/\text{m}) \quad (3.2)$$

$$q_b = (R_t / (f p + 1 - p) R_q)^{0.5} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3.3)$$

Den strömningsberoende variationen i övertryck för trapphusnivån p där personbelastningen växlar ges av skillnaden mellan tryckfallet för den personbelastade delen och medeltryckfallet för hela trapphuset för motsvarande sträcka, vilket efter förenkling kan skrivas som följer nedan. Flödet för den personbelastade delen och den obelastade delen beräknas med ett skattat medelflöde för motsvarande del av trapphuset utifrån ett linjärt avtagande trapphusflöde. De två medelflödena är $q_b + (1-p)q_x/2$ och $q_b - pq_x/2$.

$$dp_{pfx} = p(1-p) R_q h (f(q_b + (1-p)q_x/2)^2 - (q_b - pq_x/2)^2) \quad (\text{Pa}) \quad (3.4)$$

Trapphusluftens medeldensitet ρ_a för hela trapphuset beräknas genom att först beräkna medeltemperaturen T_a och därefter med denna approximativt beräkna motsvarande densitet. Felet är ytterst litet. Notera att Ah är värmeöverföringsförmågan per höjdmeter, där A skall tolkas som kontaktarean mellan trapphus och trapphusluft och h som själva värmeövergångstalet (inte att förväxla med trapphushöjden h).

Trapphusluftens temperatur ges av följande:

$$T(z) = T_s + (T_o - T_s) e^{-Ahz/(\rho c q)} \quad (^\circ\text{C})$$

Trapphusluftens medeltemperatur för en given höjdstrecka fås genom integration av ovanstående och resulterar i uttrycken (3.6) för hela trapphuset och (3.9) för den personbelastade delen av trapphuset.

$$a = Ah h / (\rho c q_b) \quad (-) \quad (3.5)$$

$$T_a = T_s + (T_o - T_s) (1 - e^{-a})/a \quad (^\circ\text{C}) \quad (3.6)$$

$$\rho_a = \rho_r (273 + T_r)/(273 + T_a) \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (3.7)$$

Trapphusluftens medeldensitet beräknas även för den personbelastade delen som ρ_b . Beräkningsuttrycken (3.8-10) är identiska med (3.5-7) bortsett från den relativa lägesfaktorn p i (3.8).

$$b = Ah h p / (\rho c q_b) = a p \quad (-) \quad (3.8)$$

$$T_b = T_s + (T_o - T_s) (1 - e^{-b})/b \quad (^\circ\text{C}) \quad (3.9)$$

$$\rho_b = \rho_r (273 + T_r)/(273 + T_b) \quad (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (3.10)$$

Den temperaturberoende variationen i övertryck för trapphusnivån där personbelastningen växlar kan nu skrivas som följer:

$$dp_T = (\rho_b - \rho_a) g h p \quad (\text{Pa}) \quad (3.11)$$

Det lägsta övertrycket kan nu skattas med relaxation som:

$$p_{min} = (2 p_{min} + p_{max} - dp_{pfx} - dp_T)/3 \quad (\text{Pa}) \quad (3.12)$$

Beräkning med (3.1-12) görs också för att kunna visa vilka parametrar som betyder vad för övertryckets variation. En direkt simulering kan inte ge denna information. En direkt simulering måste också itereras för att finna rätt inflöde vid önskat övertryck nederst i trapphuset som ger önskat övertryck överst i trapphuset.

Beräknat lägsta övertryck redovisas som funktion av lägsta simulerat övertryck i Figur 3.1. Felet ökar något med avtagande lägsta övertryck, vilket också innebär att variation i övertryck är stor. Övertrycket p_{max} har varit 50, 60, 70 och 80 Pa, vilket blir en övre gräns för lägsta undertryck p_{min} .

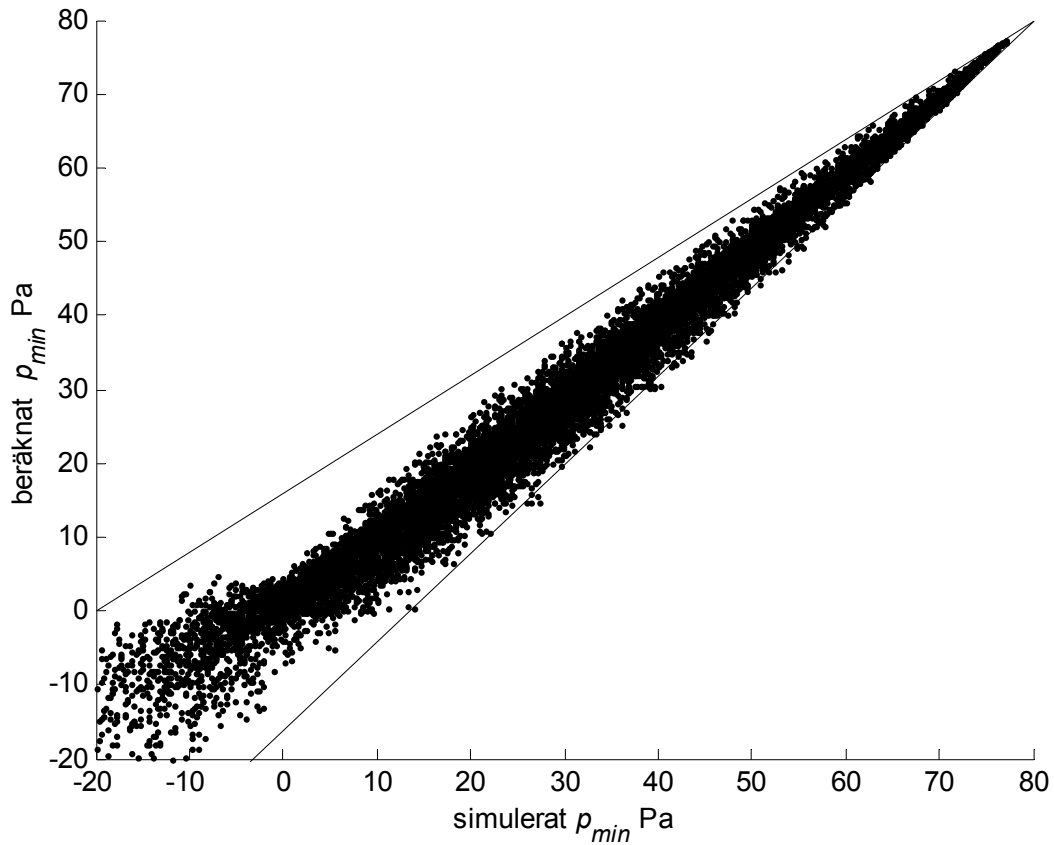
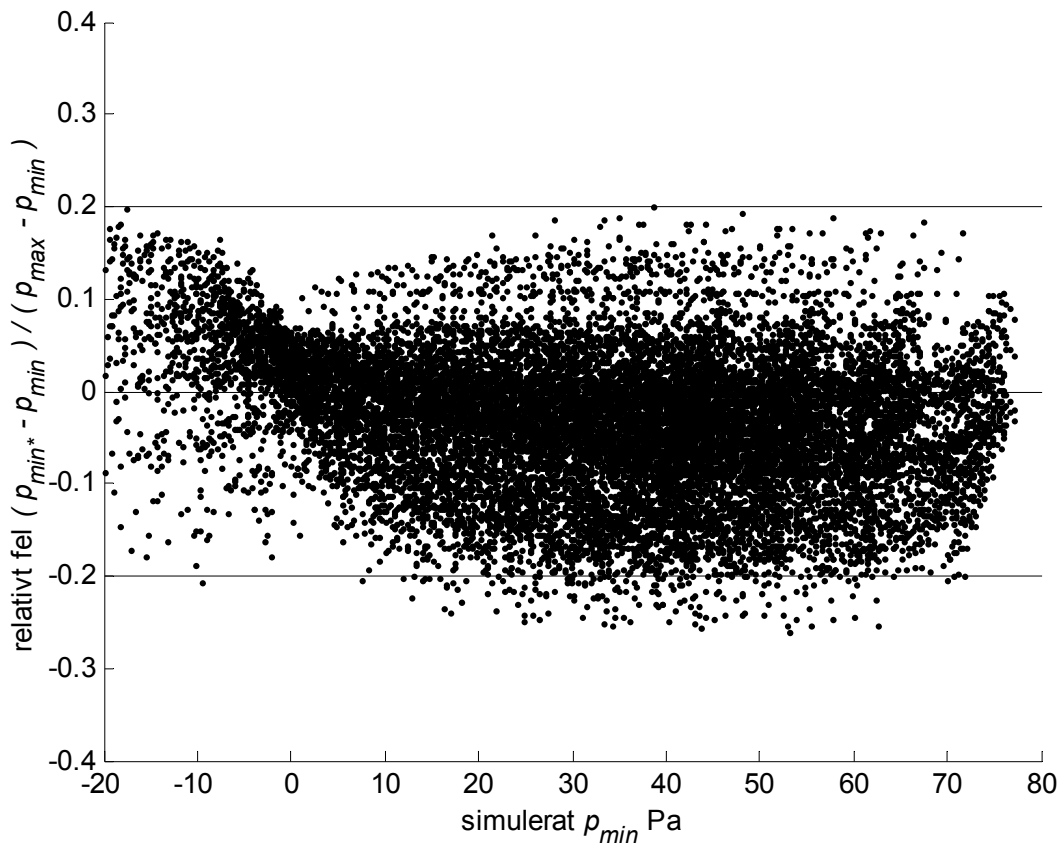
Det relativa felet i förhållande till den simulerade variationen i övertryck redovisas på samma sätt som i Figur 3.2. Det relativa felet är relativt oberoende av det lägsta övertrycket. Linjerna som motsvarar ett relativt fel på 0.2 eller -0.2 har ritats in i Figur 3.1 och 3.2.

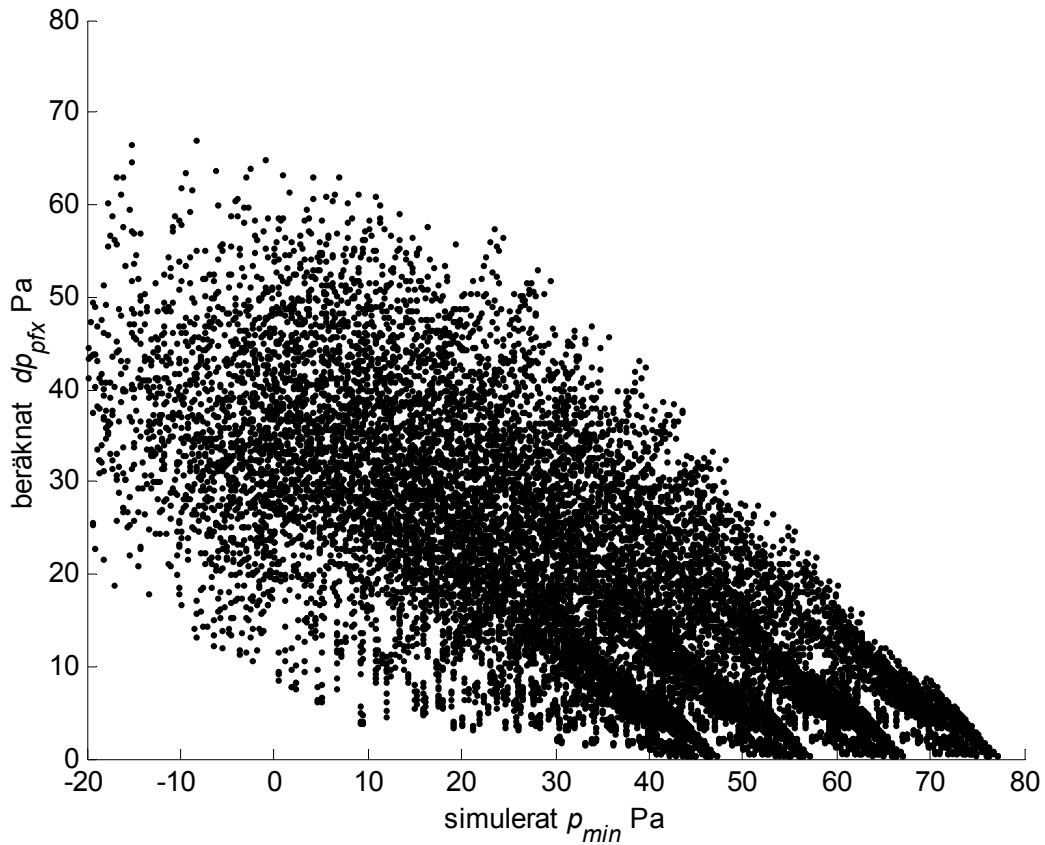
Hur stora de två skattade variationerna dp_{pfx} och dp_T är redovisas i sin tur i Figur 3.3 och 3.4 som funktion av lägsta simulerat övertryck och sist i Figur 3.5 redovisas variationen dp_T som funktion av variationen dp_{pfx} .

Hur felet i beräknat lägsta övertryck beror på de sju parametrarnas fyra olika värden redovisas i Tabell 3.2 och i Figur 3.6 med minimi-, medel- och miximivärden och i Figur 3.7 med rotmedelkvadratfelet.

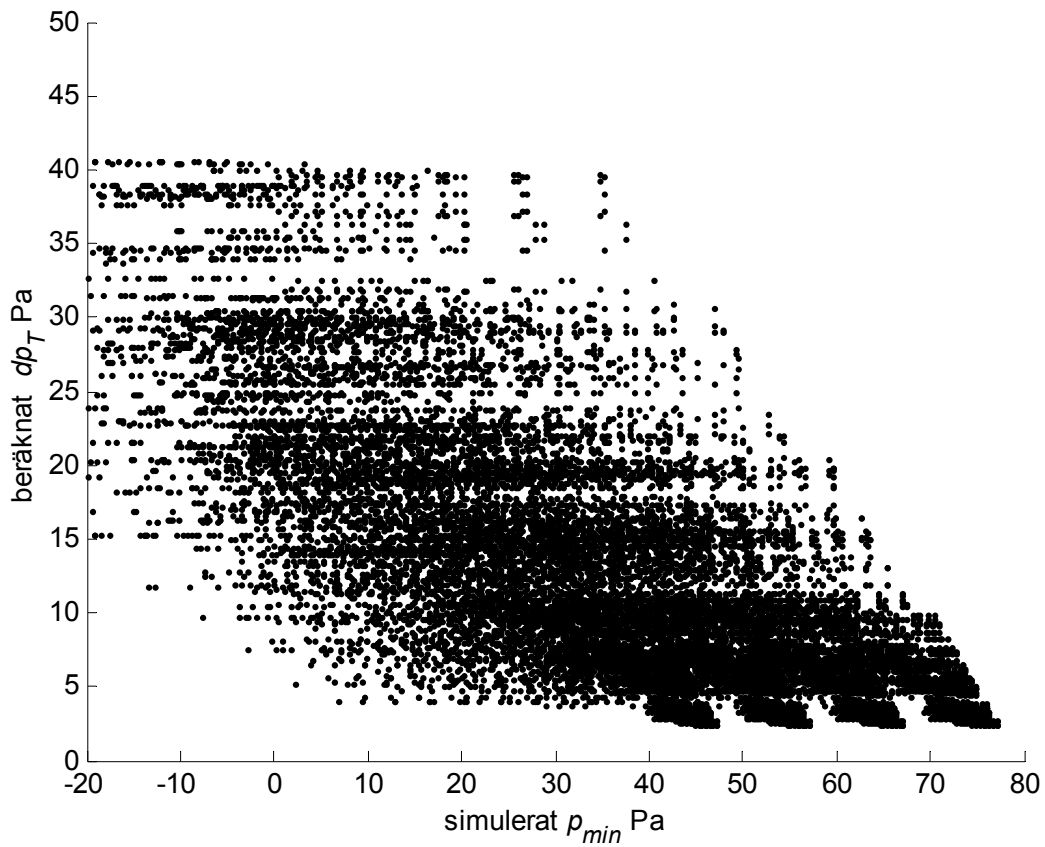
Tabell 3.2 Statistik för felet mellan beräknat och simulerat lägsta övertryck

parameter	sort	värde ₁₋₄	minfel Pa	medelfel Pa	maxfel Pa	std.fel Pa	rms.fel Pa	data fel
-	-	alla	-17.0	0.7	14.7	2.8	2.9	331
<i>Ah</i>	W/Km	50	-12.5	0.4	8.2	2.2	2.2	67
<i>Ah</i>	W/Km	100	-16.2	0.6	12.6	2.8	2.9	90
<i>Ah</i>	W/Km	150	-16.5	0.7	14.5	3.2	3.2	90
<i>Ah</i>	W/Km	200	-14.0	0.8	14.7	3.2	3.3	84
<i>f</i>	-	1	-14.0	-0.5	3.7	1.7	1.7	4
<i>f</i>	-	1.5	-9.2	0.3	8.2	2.2	2.2	62
<i>f</i>	-	2	-13.1	1.1	11.6	2.8	3.1	114
<i>f</i>	-	2.5	-16.5	1.5	14.7	3.8	4.1	151
<i>p</i>	-	0.3	-14.0	-0.4	9.0	2.7	2.7	3
<i>p</i>	-	0.4	-10.6	2.1	14.7	2.7	3.5	16
<i>p</i>	-	0.5	-11.2	1.3	12.3	2.5	2.8	132
<i>p</i>	-	0.6	-16.5	-0.6	8.0	2.5	2.6	180
<i>h</i>	m	40	-13.5	0.5	12.6	2.8	2.8	0
<i>h</i>	m	80	-16.2	0.7	11.5	2.7	2.8	0
<i>h</i>	m	120	-15.1	0.8	14.5	2.8	2.9	104
<i>h</i>	m	160	-16.5	0.4	14.7	3.1	3.2	227
<i>p_{max}</i>	Pa	50	-16.3	0.6	12.6	2.9	3.0	108
<i>p_{max}</i>	Pa	60	-16.5	0.6	14.5	2.9	2.9	81
<i>p_{max}</i>	Pa	70	-15.1	0.6	14.7	2.8	2.9	87
<i>p_{max}</i>	Pa	80	-16.2	0.6	13.5	2.8	2.9	55
<i>q_m</i>	m ³ /sm	0.005	-15.5	0.6	14.5	3.0	3.0	37
<i>q_m</i>	m ³ /sm	0.010	-16.2	0.6	10.0	2.9	2.9	57
<i>q_m</i>	m ³ /sm	0.015	-15.1	0.7	14.7	2.7	2.8	106
<i>q_m</i>	m ³ /sm	0.020	-16.5	0.6	12.3	2.9	2.9	131
<i>T_o</i>	°C	0	-16.3	0.6	12.6	2.8	2.9	9
<i>T_o</i>	°C	-10	-13.5	0.6	12.6	2.9	3.0	57
<i>T_o</i>	°C	-20	-16.5	0.6	14.7	3.0	3.1	114
<i>T_o</i>	°C	-30	-12.7	0.7	13.5	2.7	2.8	151

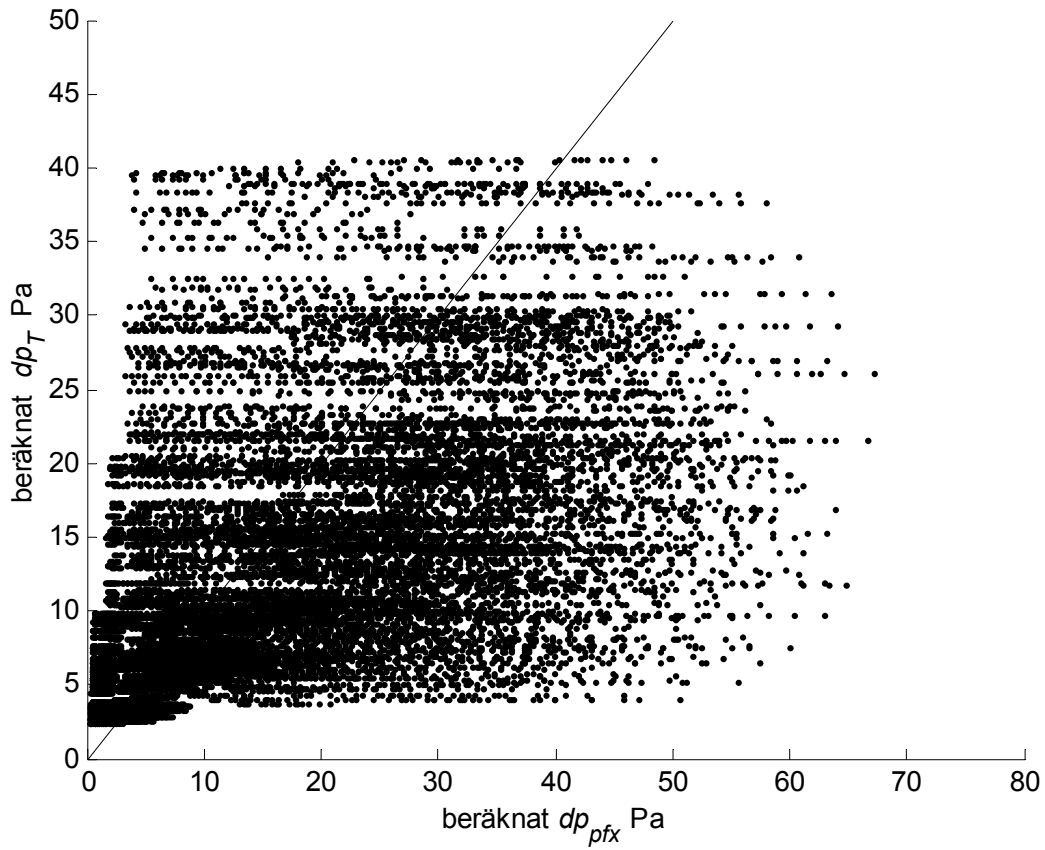
Figur 3.1 Beräknat p_{min} som funktion av simulerat p_{min} .Figur 3.2 Relativt fel för beräknat p_{min} som funktion av simulerat p_{min}



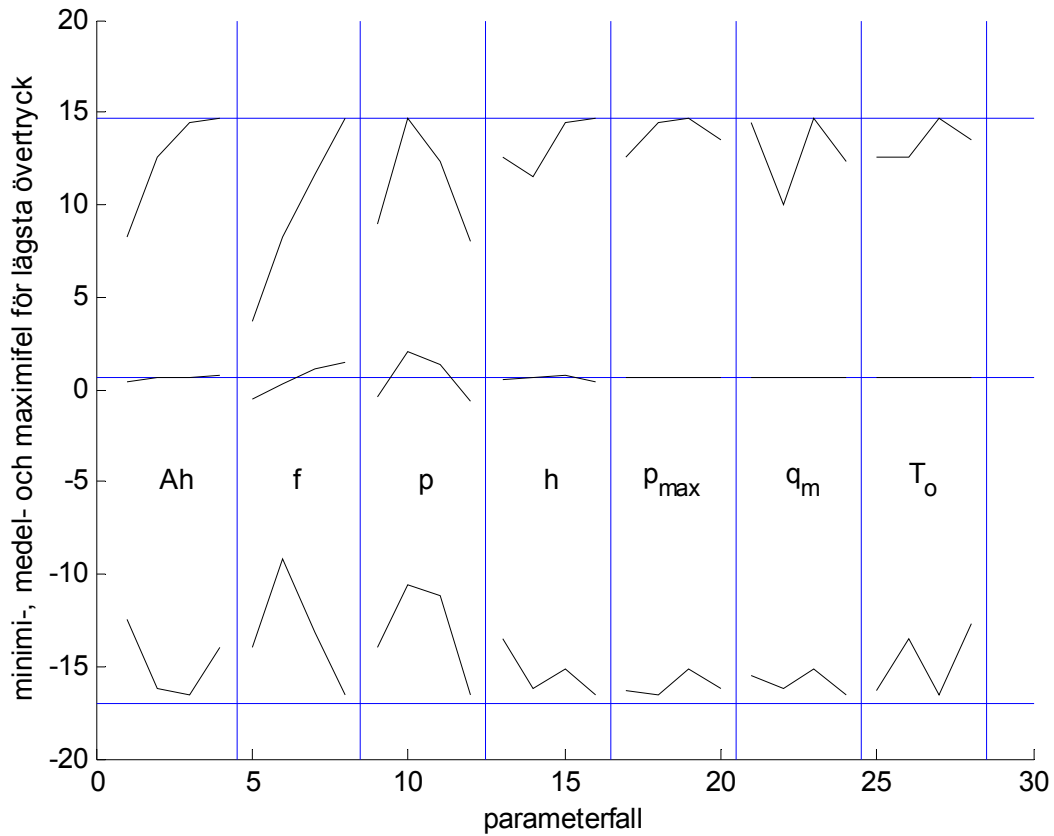
Figur 3.3 Tryckfallsberoende övertrycksvariation dp_{pfx} som funktion av simulerat p_{min}



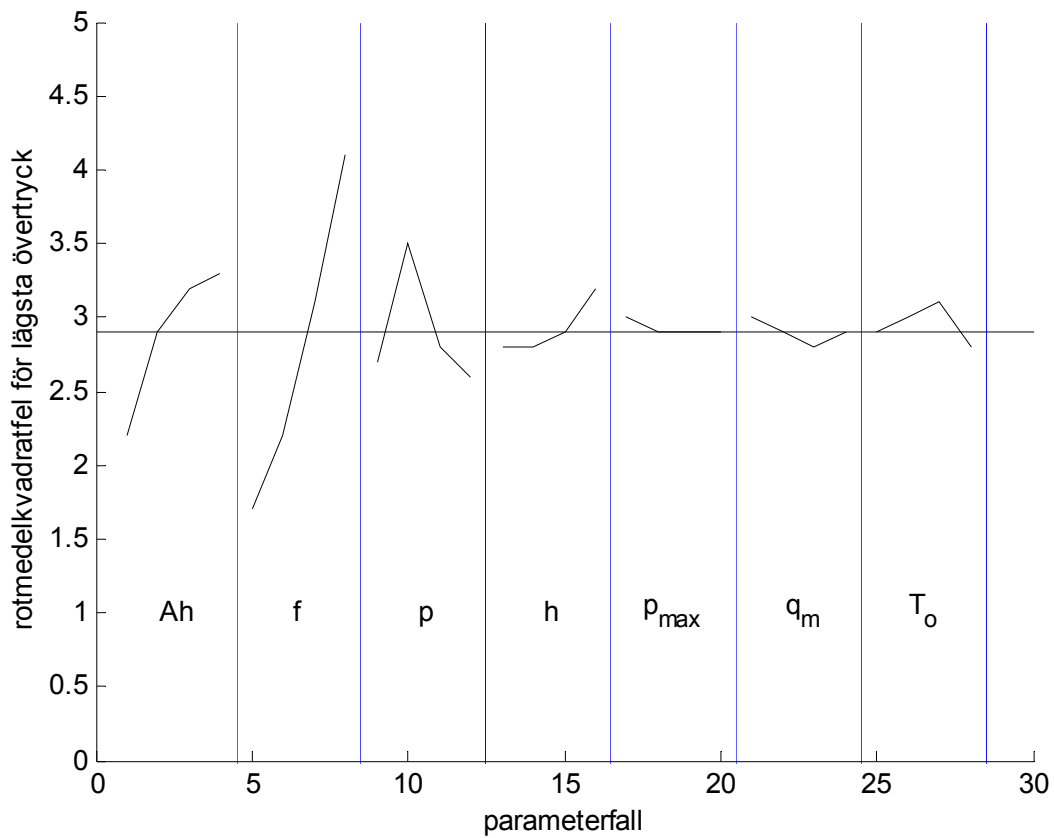
Figur 3.4 Temperaturberoende övertrycksvariation dp_T som funktion av simulerat p_{min}



Figur 3.5 Övertrycksvariationen dp_T som funktion av övertrycksvariationen dp_{pfx} .



Figur 3.6 Minsta fel, medelfel och största fel för lägsta övertryck och olika parameterfall.



Figur 3.7 Rotmedelkvadratfel för lägsta övertryck och olika parameterfall.

4 Test av olika trycksättningsmetoder

Den ideala trycksättningen med både reglerad fläkt nederst och en reglerad öppning överst i trapphuset kan förenklas. Detta finns beskrivet utförligt i Jensen (2002b). Avsikten med detta avsnitt är att testa och jämföra de olika metoderna för en och samma personbelastning och under olika klimat enligt sammanställningen nedan. Varje metod testas med tre olika personbelastningar kombinerat med fem olika klimat. Detta ger femton olika fall för varje metod. Trapphusets höjd är 100 m. Det specifika läckflödet är $1 \text{ m}^3/\text{s}$ vid 60 Pa.

De tre personbelastningarna ges av fall 10, 11 och 15 i avsnitt 3 och kan tolkas som tomt trapphus, trapphus belastat till halva höjden respektive trapphus belastat till hela höjden. Det specifika tryckfallet blir 0.1, steg från 0.2 till 0.1 vid 50 m respektive 0.2.

De fem klimatfallen ges av innetemperaturen $20 \text{ }^\circ\text{C}$ och utetemperaturerna 20, 8.9, -2.9, -13.1 och $-22.6 \text{ }^\circ\text{C}$. Den motsvarande termiska tryckgradienten blir 0, 0.5, 1, 1.5 och 2 Pa/m .

metod	fall	Tabell	Figur
reglerad öppning	1-15	4.1	4.1-3
programstyrd öppning	16-30	4.2	4.4-6
till/frånstyrd öppning	31-45	4.3	4.7-9
anpassat läckage	46-60	4.4	4.10-12
ingen öppning	61-75	4.5	4.13-15

De tre belastningsfallens övertryckskurvor redovisas för varje metod i var sitt diagram för de fem klimatfallen. Öppningens area i m^2 anges tillsammans med fallnummer som index på aktuell övertryckskurva.

De val av öppningsareor som gjorts för metoderna programstyrning och till/frånstyrning har provats fram och behöver därför inte vara de bästa. Detta gäller också fallet med anpassat läckage.

Programstyrd öppning görs som för en reglerad öppning och utan personbelastning. Till/frånstyrd öppning är 0.275 m^2 för termiska tryckgradienter lika med och större än 1 Pa/m annars är öppningen 0.01 m^2 . Flödestrycksättning med anpassat läckage redovisas för ett specifikt läckflöde om $6 \text{ m}^3/\text{s}$ vid 60 Pa.

De två sista metoderna med fallen 46-75 i sammanställningen utan någon öppning överst ovan har en liten öppning på 0.01 m^2 av beräkningstekniska skäl, vilket ökar flödena obetydligt.

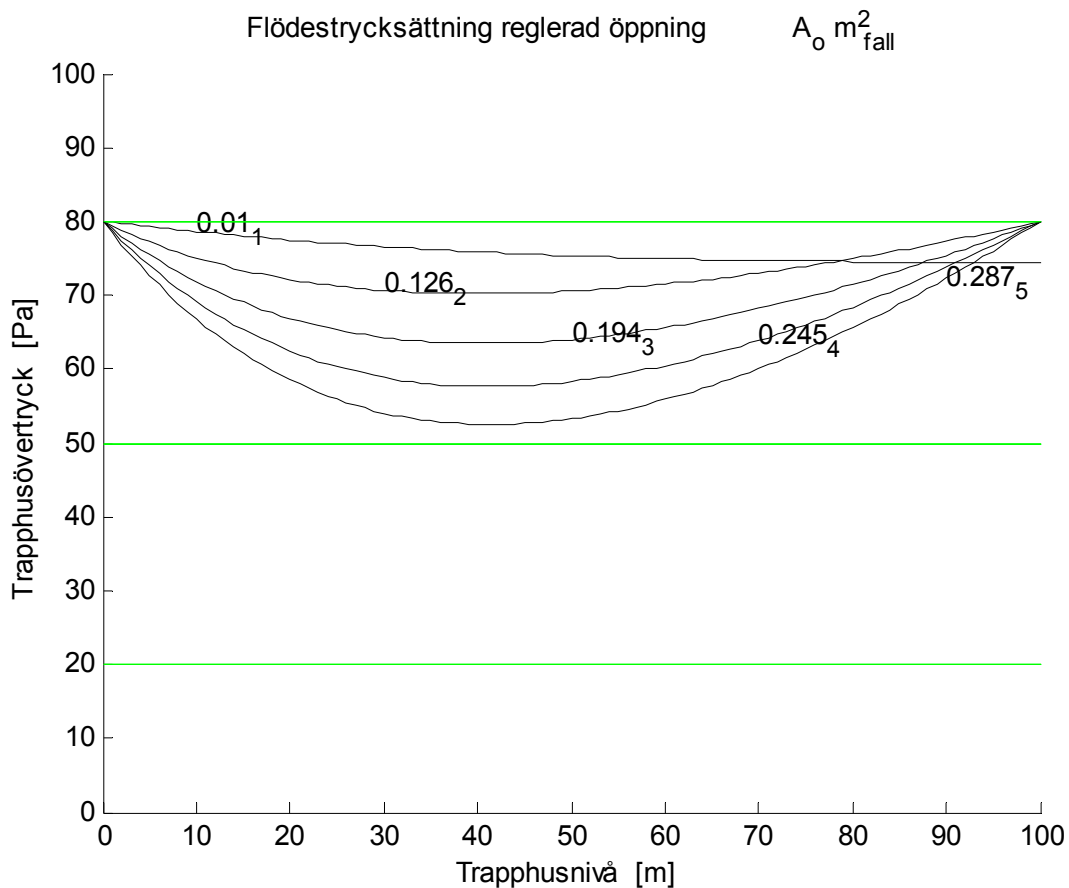
De olika metoderna kommenteras sist i detta avsnitt och de klarar inte alltid det rekommenderade övertrycksintervallet (20,80) Pa.

Flödestrycksättning reglerad öppning

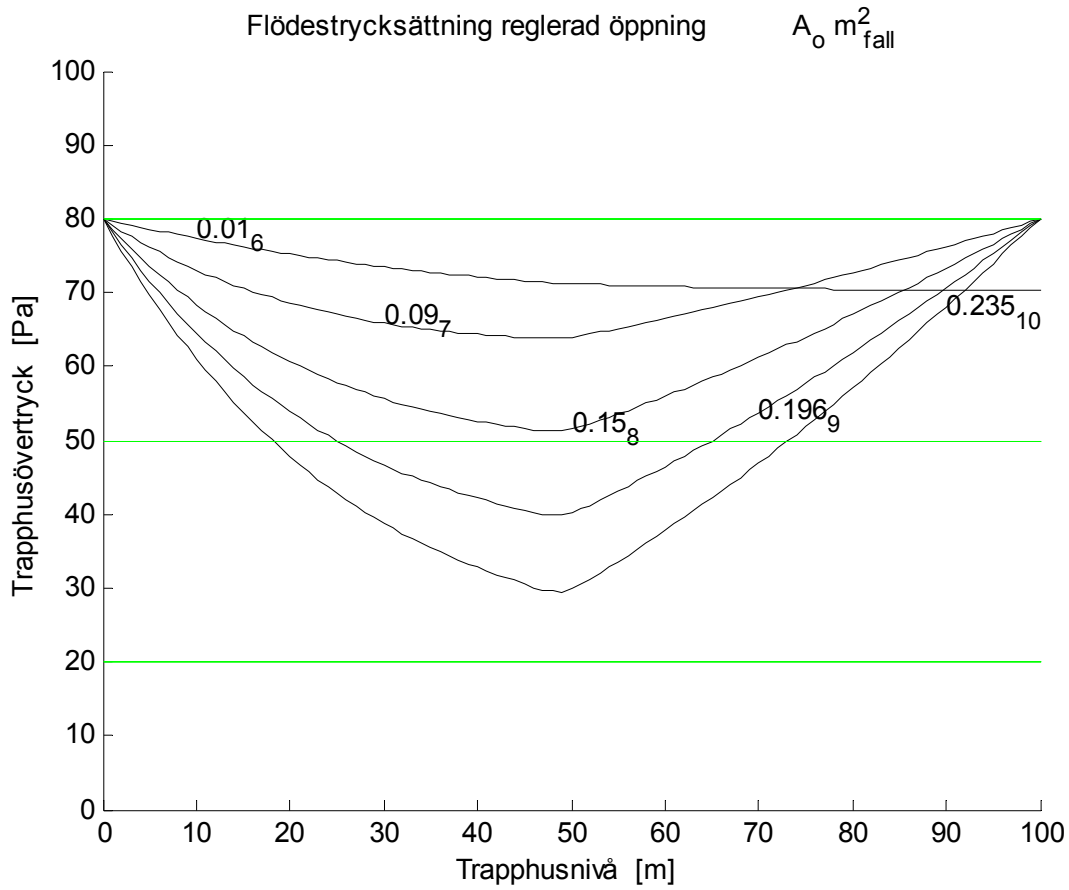
Trapphusövertryck för flödestrycksättning med reglerad öppning redovisas i Figur 4.1-3 enligt fall 1-15 i Tabell 4.1.

Tabell 4.1 Övertryck, flöde, reglerad öppningsarea och temperatur.

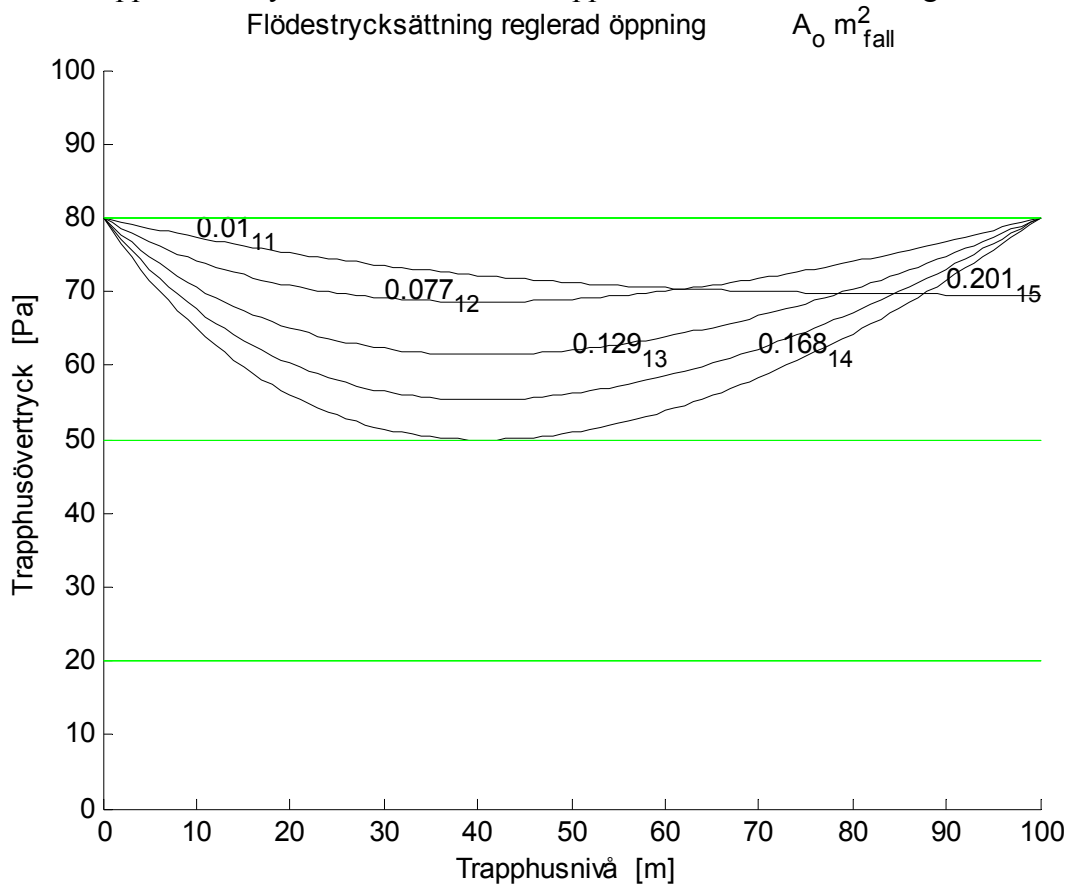
fall	figur	p_i Pa	p_o Pa	p_{min} Pa	q_i m ³ /s	q_o m ³ /s	A_o m ²	T_i °C	T_o °C	T_{med} °C
1	4.1	80.0	74.4	74.4	1.24	0.11	0.010	20.0	20.0	20.0
2	4.1	80.0	80.0	70.2	2.46	1.45	0.126	8.1	20.0	17.7
3	4.1	80.0	80.0	63.5	3.07	2.24	0.194	-2.9	19.8	14.4
4	4.1	80.0	80.0	57.7	3.46	2.83	0.245	-13.1	19.2	10.6
5	4.1	80.0	80.0	52.5	3.74	3.32	0.287	-22.6	18.4	6.6
6	4.2	80.0	70.3	70.3	1.21	0.11	0.010	20.0	20.0	20.0
7	4.2	80.0	80.0	63.8	2.03	1.04	0.090	8.1	20.0	18.1
8	4.2	80.0	80.0	51.2	2.55	1.74	0.150	-2.9	19.9	15.3
9	4.2	80.0	80.0	39.9	2.88	2.27	0.196	-13.1	19.7	12.0
10	4.2	80.0	80.0	29.5	3.11	2.72	0.235	-22.6	19.2	8.5
11	4.3	80.0	69.5	69.5	1.21	0.11	0.010	20.0	20.0	20.0
12	4.3	80.0	80.0	68.6	1.91	0.89	0.077	8.1	20.0	18.2
13	4.3	80.0	80.0	61.5	2.36	1.49	0.129	-2.9	20.0	15.6
14	4.3	80.0	80.0	55.3	2.64	1.94	0.168	-13.1	19.8	12.7
15	4.3	80.0	80.0	49.9	2.85	2.32	0.201	-22.6	19.5	9.5



Figur 4.1 Trapphusövertryck som funktion av trapphusnivå för fall 1-5 enligt Tabell 4.1.



Figur 4.2 Trapphusövertryck som funktion av trapphusnivå för fall 6-10 enligt Tabell 4.1.



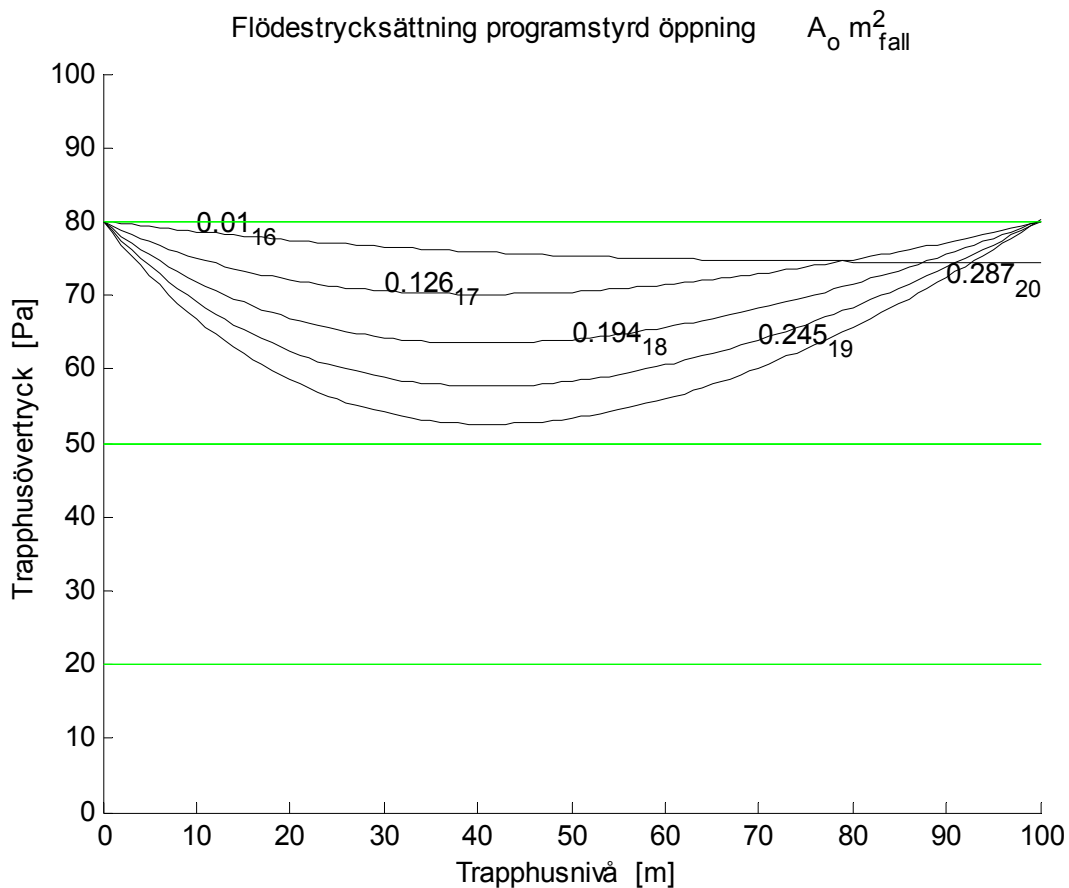
Figur 4.3 Trapphusövertryck som funktion av trapphusnivå för fall 11-15 enligt Tabell 4.1.

Flödestrycksättning programstyrd öppning

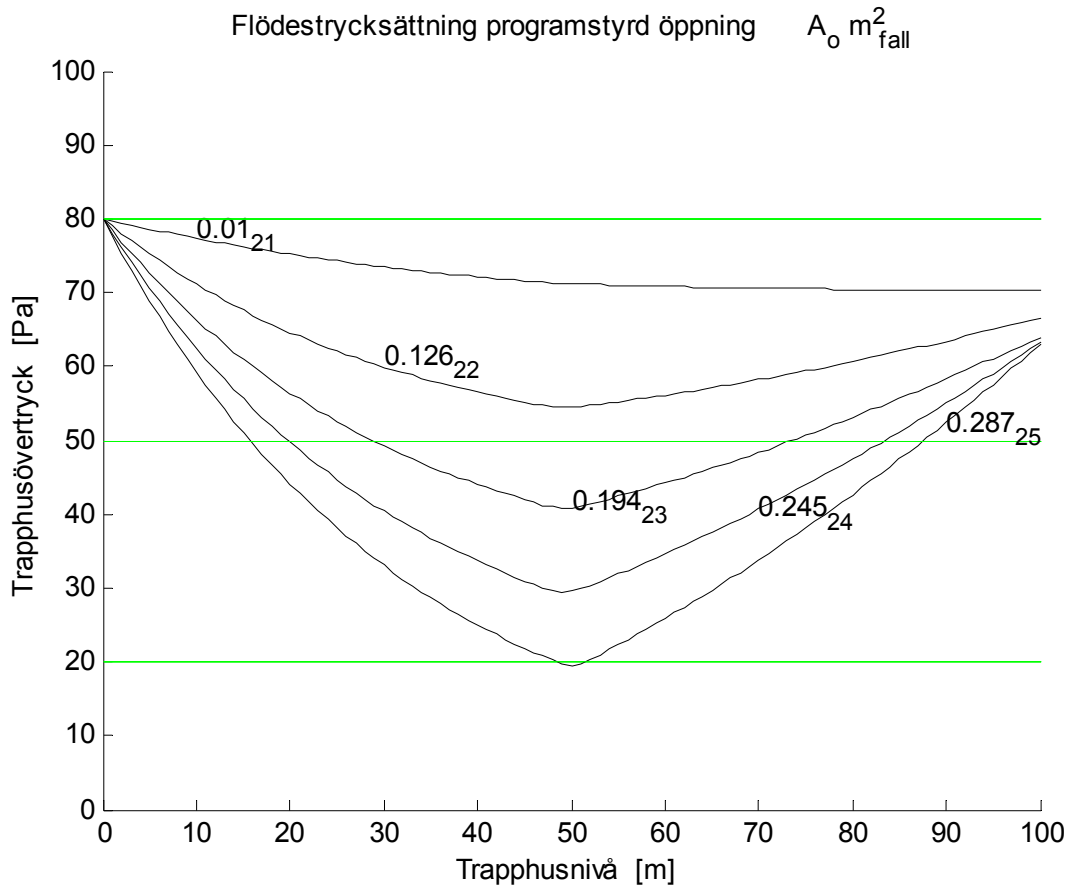
Trapphusövertryck för flödestrycksättning med programstyrd öppning redovisas i Figur 4.4-6 enligt fall 16-30 i Tabell 4.2.

Tabell 4.2 Övertryck, flöde, programstyrd öppningsarea och temperatur.

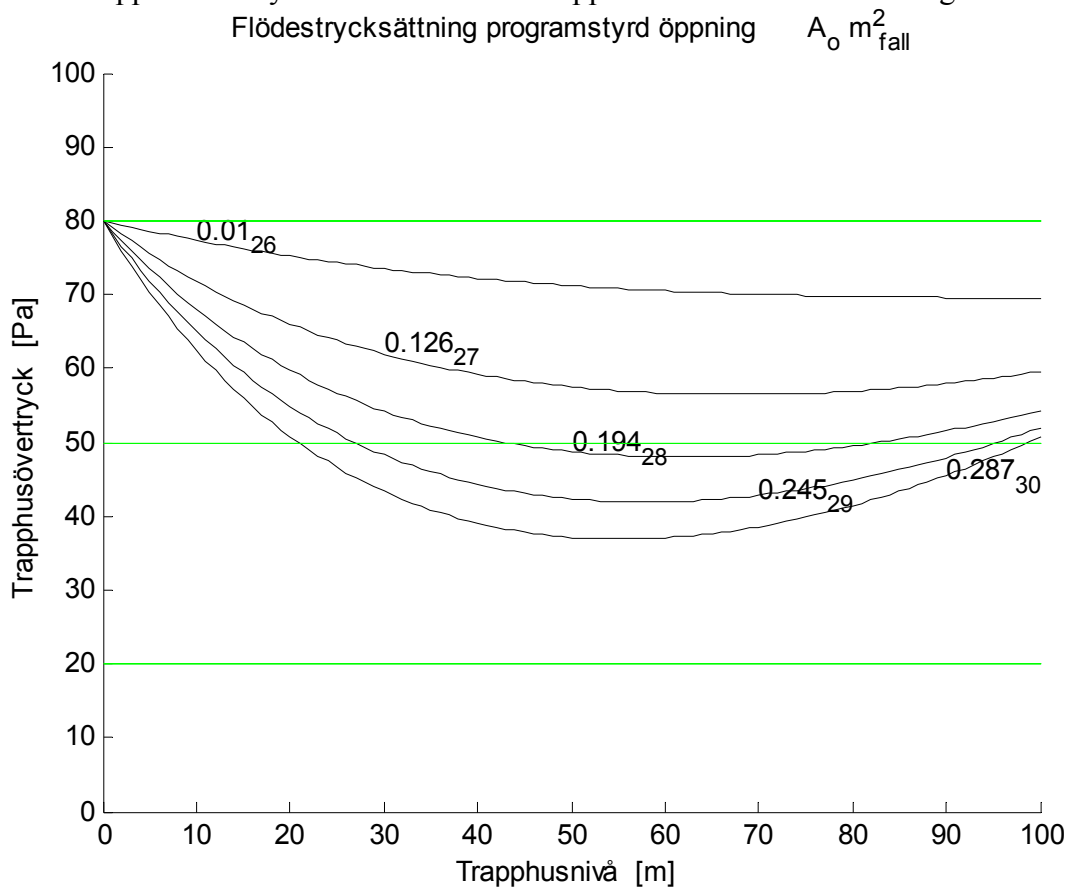
fall	figur	p_i Pa	p_o Pa	p_{min} Pa	q_i m ³ /s	q_o m ³ /s	A_o m ²	T_i °C	T_o °C	T_{med} °C
16	4.4	80.0	74.4	74.4	1.24	0.11	0.010	20.0	20.0	20.0
17	4.4	80.0	79.9	70.1	2.46	1.45	0.126	8.1	20.0	17.7
18	4.4	80.0	80.0	63.5	3.06	2.24	0.194	-2.9	19.8	14.4
19	4.4	80.0	80.1	57.7	3.46	2.83	0.245	-13.1	19.2	10.6
20	4.4	80.0	80.2	52.6	3.74	3.32	0.287	-22.6	18.4	6.6
21	4.5	80.0	70.3	70.3	1.21	0.11	0.010	20.0	20.0	20.0
22	4.5	80.0	66.5	54.4	2.25	1.33	0.126	8.1	20.0	17.9
23	4.5	80.0	64.0	40.8	2.72	2.00	0.194	-2.9	19.9	14.9
24	4.5	80.0	63.2	29.4	3.02	2.51	0.245	-13.1	19.5	11.6
25	4.5	80.0	62.9	19.6	3.23	2.94	0.287	-22.6	19.0	8.1
26	4.6	80.0	69.5	69.5	1.21	0.11	0.010	20.0	20.0	20.0
27	4.6	80.0	59.6	56.4	2.18	1.26	0.126	8.1	20.0	18.0
28	4.6	80.0	54.3	48.0	2.59	1.85	0.194	-2.9	19.9	15.2
29	4.6	80.0	51.9	41.9	2.84	2.28	0.245	-13.1	19.7	12.1
30	4.6	80.0	50.7	36.9	3.02	2.64	0.287	-22.6	19.3	8.9



Figur 4.4 Trapphusövertryck som funktion av trapphusnivå för fall 16-20 enligt Tabell 4.2.



Figur 4.5 Trapphusövertryck som funktion av trapphusnivå för fall 21-25 enligt Tabell 4.2.



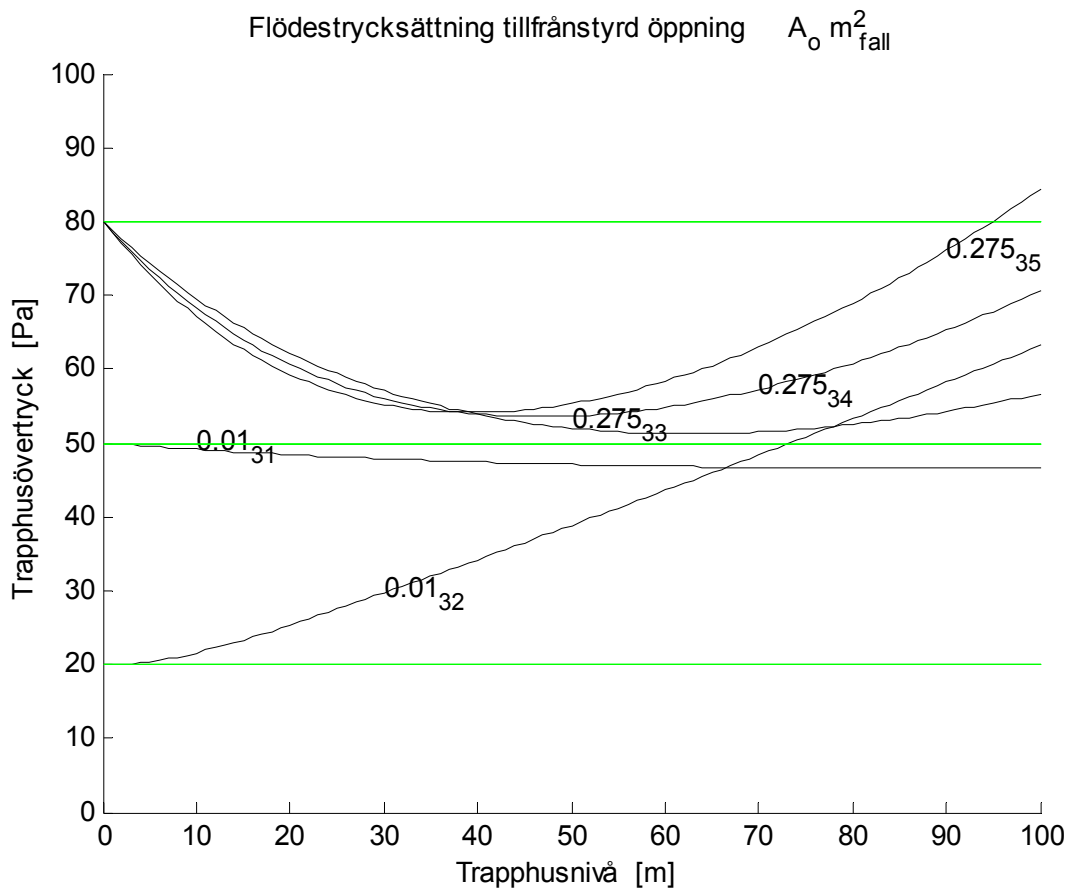
Figur 4.6 Trapphusövertryck som funktion av trapphusnivå för fall 26-30 enligt Tabell 4.2.

Flödestrycksättning till/frånstyrd öppning

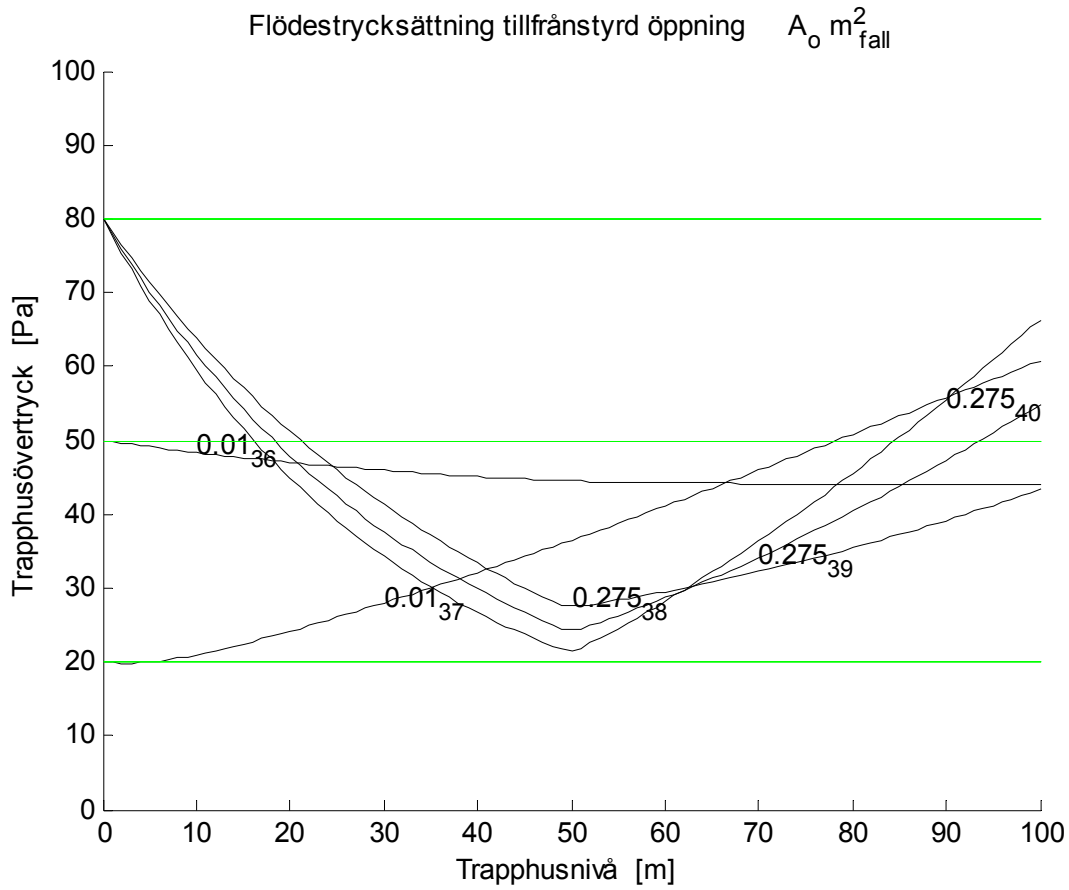
Trapphusövertryck för flödestrycksättning med till/frånstyrd öppning redovisas i Figur 4.7-9 enligt fall 31-45 i Tabell 4.3.

Tabell 4.3 Övertryck, flöde, till/frånstyrd öppningsarea och temperatur.

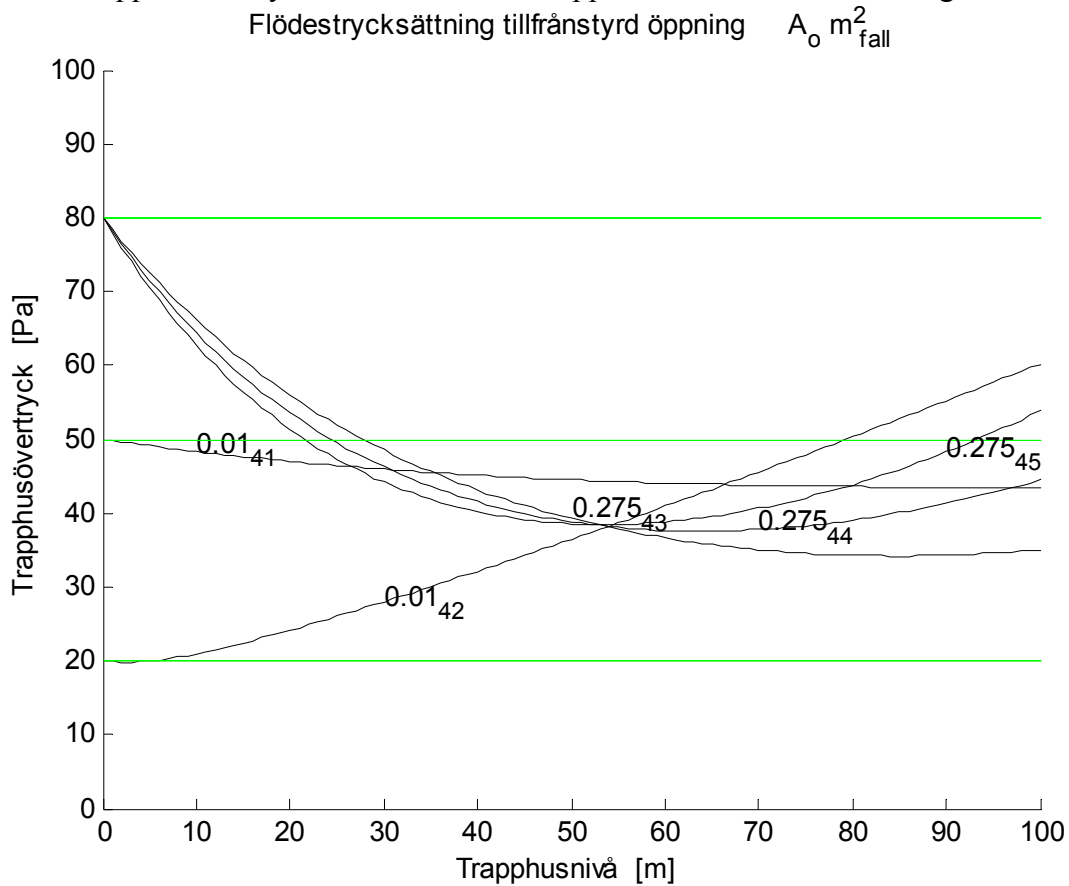
fall	figur	p_i Pa	p_o Pa	p_{min} Pa	q_i m ³ /s	q_o m ³ /s	A_o m ²	T_i °C	T_o °C	T_{med} °C
31	4.7	50.0	46.5	46.5	0.98	0.09	0.010	20.0	20.0	20.0
32	4.7	20.0	63.2	20.0	0.87	0.10	0.010	8.1	20.0	19.1
33	4.7	80.0	56.6	51.3	3.37	2.67	0.275	-2.9	19.6	13.8
34	4.7	80.0	70.6	53.6	3.56	2.98	0.275	-13.1	19.1	10.3
35	4.7	80.0	84.2	54.1	3.70	3.26	0.275	-22.6	18.4	6.7
36	4.8	50.0	44.0	44.0	0.96	0.09	0.010	20.0	20.0	20.0
37	4.8	20.0	60.8	19.8	0.84	0.10	0.010	8.1	20.0	19.1
38	4.8	80.0	43.4	27.6	2.92	2.34	0.275	-2.9	19.8	14.6
39	4.8	80.0	54.9	24.3	3.08	2.63	0.275	-13.1	19.5	11.5
40	4.8	80.0	66.4	21.6	3.20	2.89	0.275	-22.6	19.0	8.2
41	4.9	50.0	43.5	43.5	0.95	0.09	0.010	20.0	20.0	20.0
42	4.9	20.0	60.2	19.8	0.84	0.10	0.010	8.1	20.0	19.1
43	4.9	80.0	35.1	34.2	2.74	2.10	0.275	-2.9	19.9	14.9
44	4.9	80.0	44.5	37.6	2.89	2.37	0.275	-13.1	19.6	12.0
45	4.9	80.0	53.8	38.4	3.00	2.60	0.275	-22.6	19.3	8.9



Figur 4.7 Trapphusövertryck som funktion av trapphusnivå för fall 31-35 enligt Tabell 4.3.



Figur 4.8 Trapphusövertryck som funktion av trapphusnivå för fall 36-40 enligt Tabell 4.3.



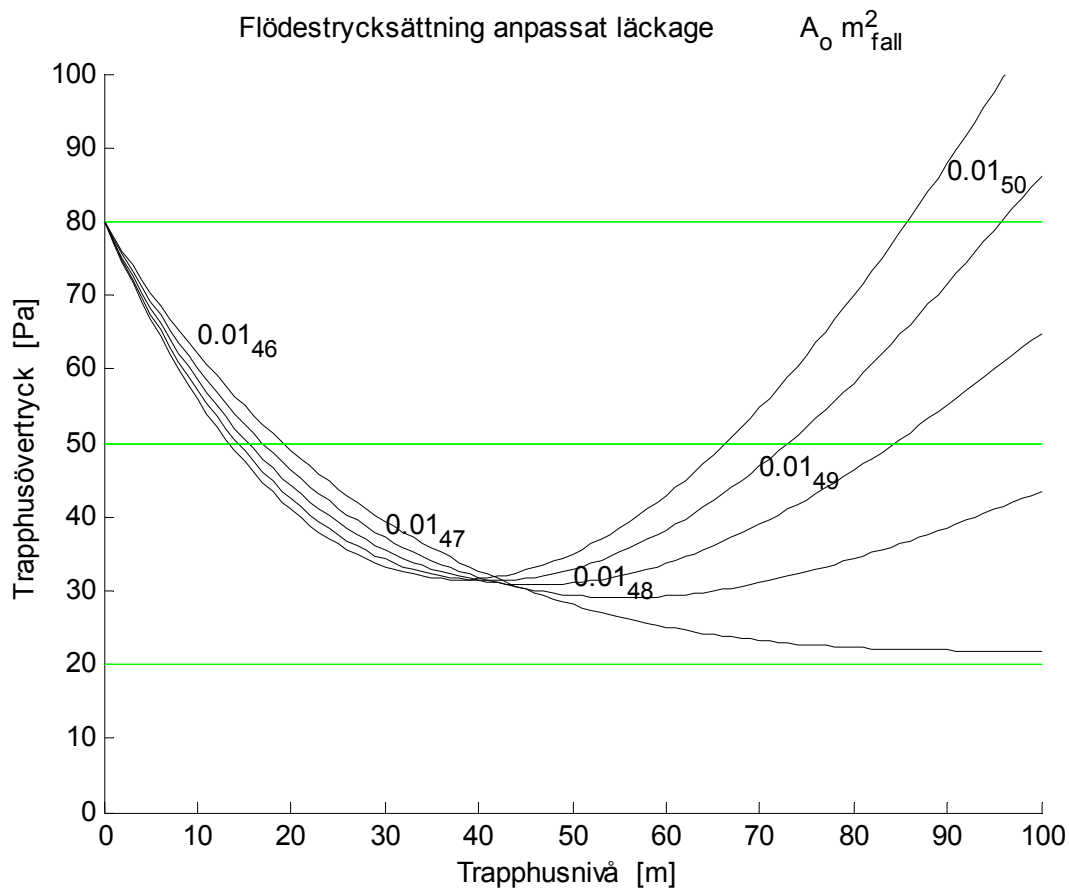
Figur 4.9 Trapphusövertryck som funktion av trapphusnivå för fall 41-45 enligt Tabell 4.3.

Flödestrycksättning anpassat läckage

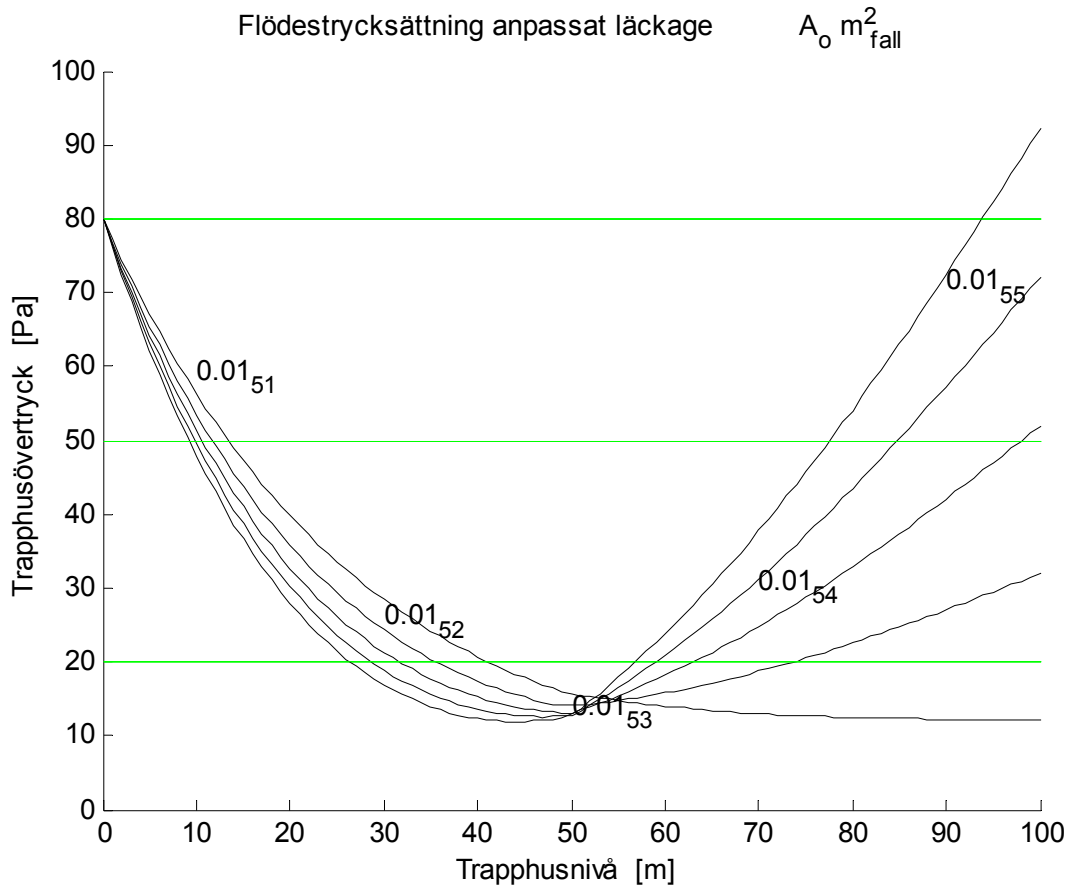
Trapphusövertryck för flödestrycksättning med anpassat läckage redovisas i Figur 4.10-12 enligt fall 46-60 i Tabell 4.4. Det nominella läckflödet är $6 \text{ m}^3/\text{s}$ vid 60 Pa .

Tabell 4.4 Övertryck, flöde och temperatur för fallet anpassat läckage.

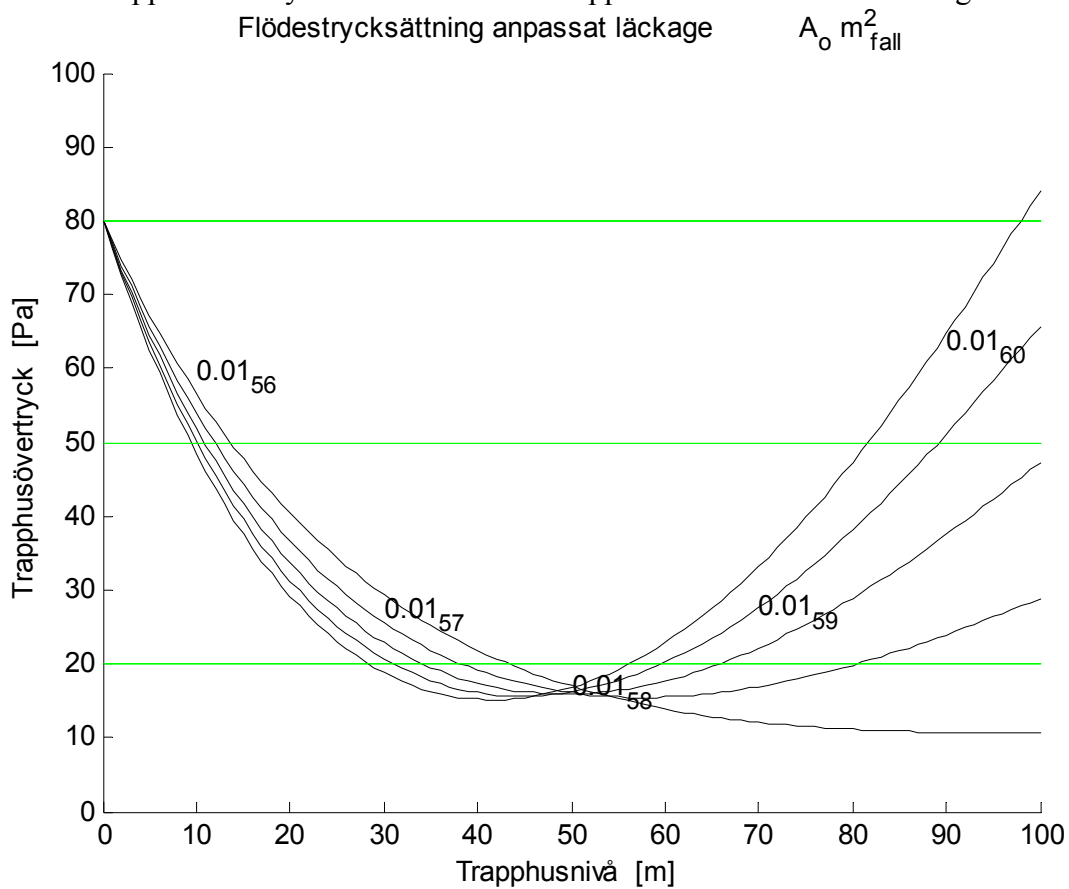
fall	figur	p_i Pa	p_o Pa	p_{\min} Pa	q_i m^3/s	q_o m^3/s	A_o m^2	T_i $^{\circ}\text{C}$	T_o $^{\circ}\text{C}$	T_{med} $^{\circ}\text{C}$
46	4.10	80.0	21.9	21.9	4.56	0.06	0.010	20.0	20.0	20.0
47	4.10	80.0	43.4	29.1	4.75	0.09	0.010	8.1	20.0	16.7
48	4.10	80.0	64.9	30.8	4.87	0.10	0.010	-2.9	20.0	13.2
49	4.10	80.0	86.2	31.4	4.95	0.12	0.010	-13.1	20.0	9.7
50	4.10	80.0	107.4	31.5	5.02	0.13	0.010	-22.6	20.0	6.1
51	4.11	80.0	12.2	12.2	3.77	0.05	0.010	20.0	20.0	20.0
52	4.11	80.0	32.0	14.1	3.92	0.07	0.010	8.1	20.0	17.2
53	4.11	80.0	51.9	13.1	4.01	0.10	0.010	-2.9	20.0	14.2
54	4.11	80.0	72.0	12.6	4.08	0.11	0.010	-13.1	20.0	11.2
55	4.11	80.0	92.1	11.9	4.12	0.12	0.010	-22.6	20.0	8.0
56	4.12	80.0	10.7	10.7	3.75	0.04	0.010	20.0	20.0	20.0
57	4.12	80.0	28.8	15.4	3.89	0.07	0.010	8.1	20.0	17.2
58	4.12	80.0	47.2	15.9	3.98	0.09	0.010	-2.9	20.0	14.3
59	4.12	80.0	65.7	15.6	4.05	0.10	0.010	-13.1	20.0	11.3
60	4.12	80.0	84.1	15.1	4.09	0.12	0.010	-22.6	20.0	8.2



Figur 4.10 Trapphusövertryck som funktion av trapphusnivå för fall 46-50 enligt Tabell 4.4.



Figur 4.11 Trapphusövertryck som funktion av trapphusnivå för fall 51-55 enligt Tabell 4.4.



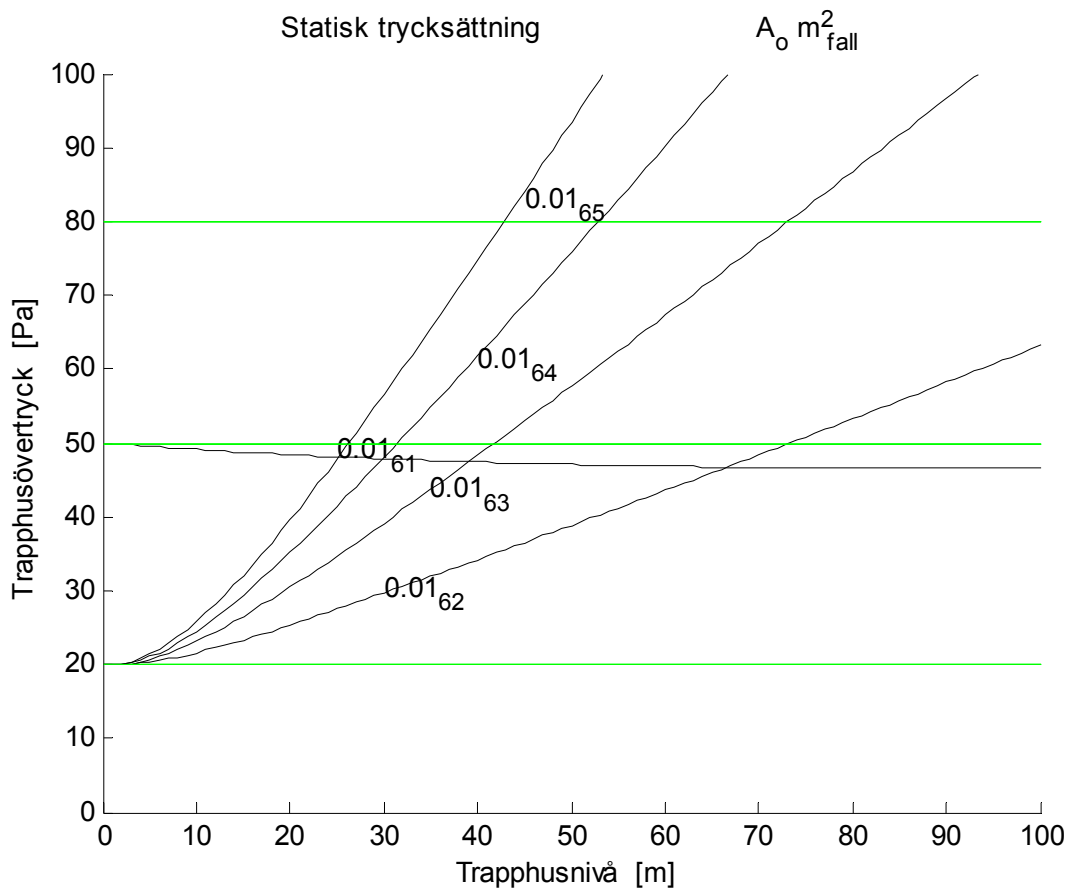
Figur 4.12 Trapphusövertryck som funktion av trapphusnivå för fall 56-60 enligt Tabell 4.4.

Statisk trycksättning

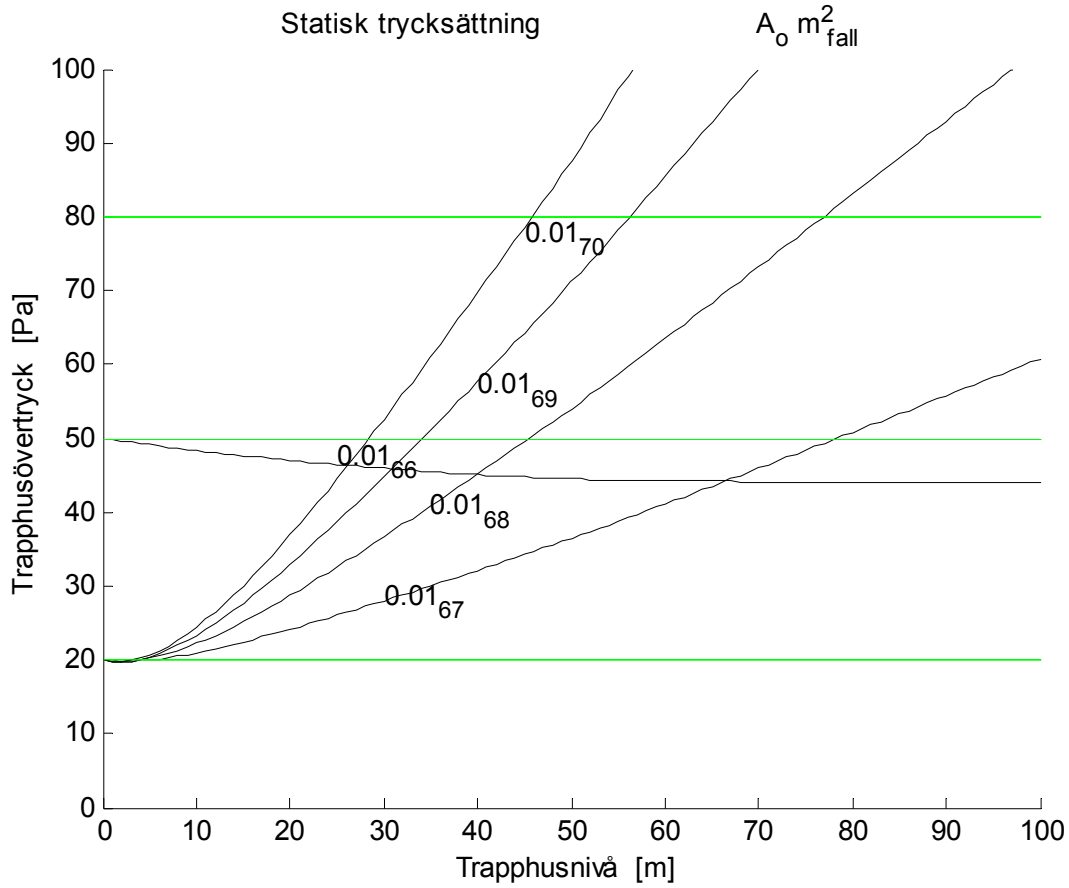
Trapphusövertryck för statisk trycksättning redovisas i Figur 4.13-15 enligt fall 61-75 i Tabell 4.5.

Tabell 4.5 Övertryck, flöde och temperatur för fallet statisk trycksättning.

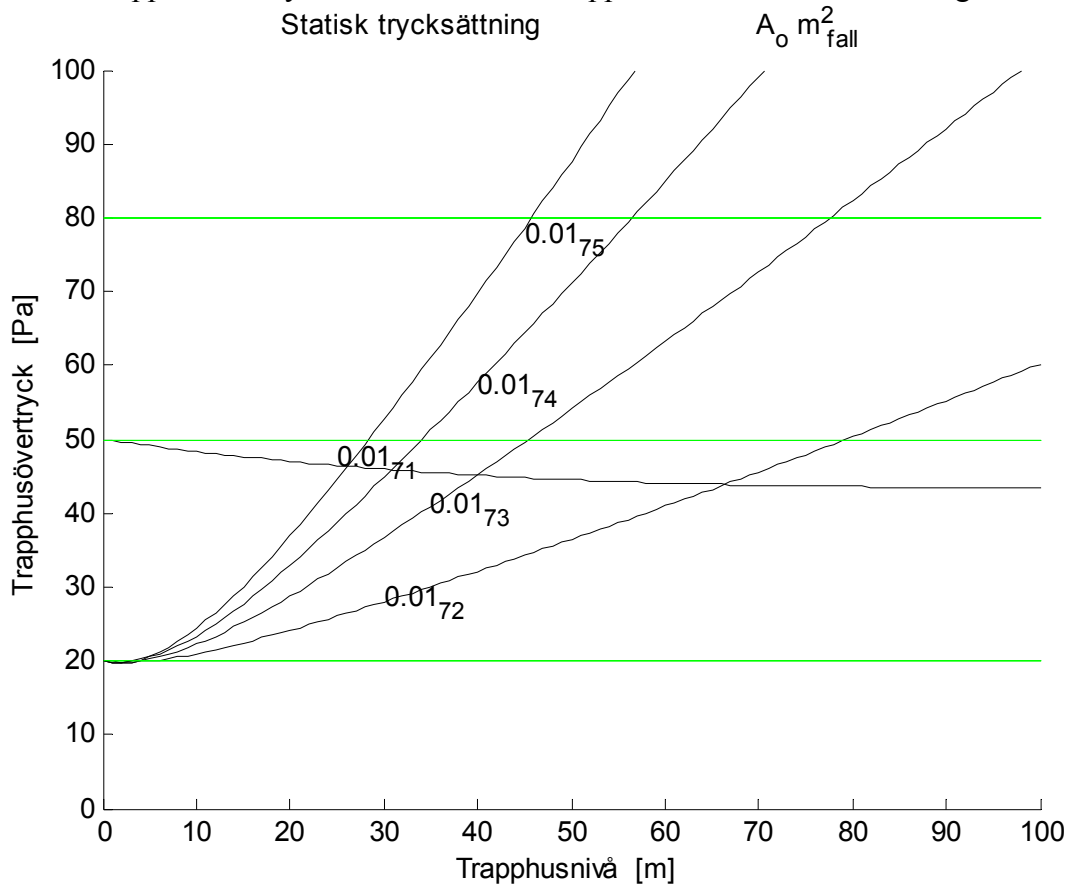
fall	figur	p_i Pa	p_o Pa	p_{min} Pa	q_i m^3/s	q_o m^3/s	A_o m^2	T_i $^{\circ}C$	T_o $^{\circ}C$	T_{med} $^{\circ}C$
61	4.13	50.0	46.5	46.5	0.98	0.09	0.010	20.0	20.0	20.0
62	4.13	20.0	63.2	20.0	0.87	0.10	0.010	8.1	20.0	19.1
63	4.13	20.0	106.6	20.0	1.01	0.13	0.010	-2.9	20.0	18.0
64	4.13	20.0	149.3	19.9	1.12	0.16	0.010	-13.1	20.0	16.7
65	4.13	20.0	191.5	19.9	1.19	0.18	0.010	-22.6	20.0	15.3
66	4.14	50.0	44.0	44.0	0.96	0.09	0.010	20.0	20.0	20.0
67	4.14	20.0	60.8	19.8	0.84	0.10	0.010	8.1	20.0	19.1
68	4.14	20.0	102.9	19.8	0.99	0.13	0.010	-2.9	20.0	18.0
69	4.14	20.0	144.6	19.8	1.09	0.16	0.010	-13.1	20.0	16.8
70	4.14	20.0	185.6	19.8	1.16	0.18	0.010	-22.6	20.0	15.4
71	4.15	50.0	43.5	43.5	0.95	0.09	0.010	20.0	20.0	20.0
72	4.15	20.0	60.2	19.8	0.84	0.10	0.010	8.1	20.0	19.1
73	4.15	20.0	102.0	19.8	0.99	0.13	0.010	-2.9	20.0	18.0
74	4.15	20.0	143.2	19.8	1.09	0.15	0.010	-13.1	20.0	16.8
75	4.15	20.0	183.9	19.8	1.16	0.18	0.010	-22.6	20.0	15.4



Figur 4.13 Trapphusövertryck som funktion av trapphusnivå för fall 61-65 enligt Tabell 4.5.



Figur 4.14 Trapphusövertryck som funktion av trapphusnivå för fall 66-70 enligt Tabell 4.5.



Figur 4.15 Trapphusövertryck som funktion av trapphusnivå för fall 71-75 enligt Tabell 4.5.

Kommentarer

Flödestrycksättning med reglerad öppning klarar alla de femton driftsfallen med god marginal. Lägsta övertryck 29.5 Pa fås för fall 10 med lägsta utetemperatur och halv personbelastning. Den reglerade öppningens effektiva area är aldrig större än 0.3 m², vilket är realiserbart.

Flödestrycksättning med programstyrd öppning är identisk med den för reglerad öppning för fall 1-5 utan personbelastning. Endast driftsfall 25 med ett lägsta övertryck på 19.6 Pa klarar inte kraven på övertrycksintervallet (20,80) Pa. Resultatet kan tyckas vara bra, men om trapphustryckfallet utan och med personbelastning ändras något kan en programstyrd öppning resultera i stora avvikelser jämfört med en reglerad öppning som automatiskt anpassar sig efter förutsättningarna.

Flödestrycksättning med till/frånstyrd öppning klarar alla driftsfall utom fall 35 som resulterar i ett övertryck överst på 84.2 Pa. Till/frånstyrning är en förenklad form av programstyrning med en fix öppningsarea. Resultatet är givetvis beroende av förutsättningarna på samma sätt som för programstyrd öppning jämfört med reglerad öppning.

Flödestrycksättning med anpassat läckage klarar bara tre av de femton testfallen. Ett lägre trapphus hade gått att trycksätta med denna metod. Den nominella läckfödet är 6 m³/s vid 60 Pa, vilket är ett högt värde. Inflödet är genomgående lägre med ett fall över 5 m³/s, nio fall mellan 3 m³/s och 4 m³/s och fem fall mellan 3 m³/s och 4 m³/s. Volyminflödet är lägst för låga utetemperaturer och trapphusflödet värms efterhand till den nominella temperaturen på 20 °C. Även detta resultat är beroende av förutsättningarna. En ändring av ett anpassat läckage kanske inte heller är möjligt att genomföra.

Statisk flödestrycksättning klarar bara fallen med termisk tryckgradient 0 och 0.5 Pa/m. Skillnaden mellan de tre personbelastningsfallen är liten, eftersom trapphusflödet är begränsat till läckflödet. Denna metod har tagits med för att visa att den kan användas med en trycksluss med två dörrar i serie som klarar 160 Pa. De tre fallen 65, 70 och 75 med den termiska gradienten 2 Pa/m klaras inte av.

En kombination med trycksluss och en mindre till/frånstyrd öppning överst visar sig vara en möjlig lösning. Trycksättning till 40 Pa nederst och en effektiv area på 0.1 m² för termiska tryckgradients lika med och större än 0.5 Pa/m klarar alla testfallen inom det utökade tryckintervallet (20,160) Pa.

5 Handbok - arbetsgång

Detta avsnitt är inte en fullständig handbok för trycksättning av trapphus för utrymning utan redovisar själva arbetsgången för val av trycksättningsmetod och dimensionering. Det går att utforma nedanstående arbetsgång med tidiga utgångar för enkla fall med enkla lösningar. Alla punkterna nedan behöver givetvis inte gås igenom för ett lågt trapphus.

Notera också att endast vinterfallet behandlas i enlighet med tidigare redovisade avgränsningar. Trapphusets storlek och utformning med öppet eller slutet trapplopp och med halv- eller heltrappa är fastlagt och är uppvärmt till normal innetemperatur.

Några tillämpningsexempel finns inte med i texten här. En arbetsrapport med tillämpning av detta avsnitts arbetsgång på tre olika höga trapphus med höjderna 60, 120 och 180 m är planerad.

Arbetsgången omfattar ett antal steg och de kan sammanföras i ett antal rubriksatta underavsnitt och strukturen för detta redovisas nedan.

Trycksättning av låga trapphus	Steg 1
Övertrycksintervall för trycksättning utan slussar	Steg 2-7
Övertrycksintervall för trycksättning med slussar	Steg 8-9
Trycksättning utan utluftning	Steg 10
Modellparametrar för trycksättning med utluftning	Steg 11-14
Trycksättning med utluftning	Steg 15-18
Dimensionering av trycksättningsfläkt och utluftning	Steg 19-20

Funktionskontroll av trycksättning

Trycksättning av låga trapphus

1. Bestäm trapphushöjden h (m).

Trycksättning utan utluftning kan för låga trapphus ske enligt sammanställningen nedan för olika lägsta utetemperaturer och utan eller med slussar. Innetemperaturen antas vara 20 °C och det tillåtna övertrycksintervallet är (20,80) Pa.

utan slussar och lägsta utetemperatur -23 °C	30 m
utan slussar och lägsta utetemperatur -32 °C	24 m
utan slussar och lägsta utetemperatur -40 °C	20 m
med slussar och lägsta utetemperatur -23 °C	60 m
med slussar och lägsta utetemperatur -32 °C	48 m
med slussar och lägsta utetemperatur -40 °C	40 m

Övertrycksintervall för trycksättning utan slussar

2. Bestäm trapphusdörrarnas bredd b_d (m), höjd h_d (m) och area A_d (m²).

3. Bestäm högsta tillåtna trapphusövertryck p_{max} (Pa).

Denna övre gräns säkerställer att en trapphusdörr kan öppnas manuellt med en mindre kraft. Dörren antas öppnas inåt mot det trycksatta trapphuset. Lokalens tryck antas vara lika med trycket ute på samma nivå. Den totala manuella öppningskraften är begränsad till 133 N för en person. Friktionskraften sätts till 53 N, vilket ger resterande öppningskraft F på 80 N för att övervinna den återstående tryckkraften som själva trycksättningen skapar i dörrens mitt. Öppningskraften antas påverka dörrens kant vilket ger en hävarm 2 på 1 i förhållande till tryckkraften i dörrens mitt eller en hävarmsfaktor $k=2$. Detta är ett något avrundat värde, eftersom dörrhandtagets centrum inte är placerat över dörrkant/karmkant.

Det högsta tillåtna trapphusövertrycket ges av följande uttryck:

$$p_{max} = kF/A_d \quad (\text{Pa}) \quad (5.1)$$

4. Bestäm inneluftens dimensionerande temperatur T_i (K) och densitet ρ_i (kg/m³).

Normal innetemperatur kan användas. Samma temperatur används också för trapphusets alla innerytor, när trapphusluftens temperatur skall beräknas med uteluft som trycksättningsluft.

5. Bestäm uteluftens dimensionerande temperatur T_u (K) och densitet ρ_u (kg/m³).

I VVS-handboken finns det flera dimensionerande temperaturer för olika installationstekniska ändamål redovisade med isothermkurvor på en Sverigekarta. Begreppet DUT finns för värmesystem och tar hänsyn till en viss termisk tröghet. Begreppet EUT finns för ventilationssystem och passar bättre. Begreppet EUT 1 anger medelvärde under ett dygn under en trettioårsperiod. Sannolikheten att lägre utetemperaturer inträffar är därför mindre än 0.0001.

6. Bestäm brandluftens dimensionerande temperatur T_b (K) och densitet ρ_b (kg/m³).

Temperaturen antas vara en medeltemperatur i den brandutsatta lokalen räknat över själva dörren.

7. Bestäm lägsta tillåtna trapphusövertryck p_{min} (Pa)

För att förhindra brandgasspridning till trapphuset måste trapphustrycket vara högre än lokaltrycket, vilket är summan av den termiska tryckskillnaden över dörren, brandtrycket och vindtrycket.

Om lokalen är tryckavlastad på något sätt, skall vindtrycket beaktas och något brandtryck kan inte uppstå. Omvändningen med en icke tryckavlastad lokal kräver att brandtrycket beaktas och att vindtryckets inverkan kan försummas.

Det lägsta trapphusövertryck som alltid krävs är lika med den termiska tryckskillnaden över dörren, vilket placerar neutrallagret trapphus-lokal i dörrens överkant. Den termiska tryckskillnaden beräknas med uppgifter från punkt 2, 4 och 6. Neutrallagret lokal-ute antas vara i golvnivå, vilket ger en överskattning av den lägsta trapphusövertrycket, vilket beräknas som:

$$\Delta p_T = (\rho_i - \rho_b)gh_d \quad (\text{Pa}) \quad (5.2)$$

Den termiska tryckskillnaden beror på luftens temperaturberoende densitet och att det absoluta lufttrycket avtar uppåt beroende på luftens densitet. Några något avrundade siffervärden på detta avtagande är 12, 6, 4 och 3 Pa/m för 300, 600, 900 respektive 1200 K. Temperaturparet 300/1200 K ger tryckgradienten 9 Pa/m.

Normalt skapar vinden ett mindre undertryck i en byggnad, men betydande över- eller undertryck kan uppstå i en lokal om lokalen öppnas upp på en lovartsida eller en icke lovartsida. Vindtrycket Δp_v i förhållande till en referenspunkt i den fria ostörda vinden och för en given yta kan beräknas som följer:

$$\Delta p_v = f \rho_u v^2/2 \quad (\text{Pa}) \quad (5.3)$$

där

f	formfaktor för en given yta, -
v	fri vindhastighet, m/s
ρ_u	uteluftens densitet, kg/m ³

Formfaktorn f kan vara uppemot 1 på en lovartsida och neremot -1 på en läside. Enbart vindtrycket kan vara större än den högsta tillåtna tryckskillnaden över en dörr. En vindhastighet på 10 m/s och en luftdensitet på 1.2 kg/m³ ger ett vindtryck på 60 Pa.

Brandens brandeffekt skapar ett brandflöde q_b m³/s och därmed ett brandövertryck p_b Pa, vilket ökar det lägsta tillåtna trapphusövertrycket. En tumregeln är att 1 MW brandeffekt ger brandflödet 1 m³/s. Brandövertryck råder endast under en kortare tid innan tryckavlastning sker genom fönstersprängning. Det kan vara omöjligt att förhindra brandgasspridning under en kortare tid, eftersom brandtrycket kan vara högre än högsta tillåtna trapphus övertryck. Det kan därför inte vara fel att helt bortse från brandtrycket p_b som skapas av brandeffekten.

För fallet med aktiverade brandgasspjäll i både tillufts-system och frånluftssystem kan tryckökningen lika med brandövertrycket p_b skattas med uppgifter från en provtryckning eller med antagande om att läckaget är lika med den nominella lufttätheten för omslutande ytor. Tillåtet läckage enligt BBR är 0.8 l/sm² för bostäder och 1.6 l/sm² för lokaler vid en tryckskillnad om 50 Pa.

$$p_b = \Delta p_l (q_b/q_l)^2 \quad (\text{Pa}) \quad (5.4)$$

där

Δp_l	tryckskillnad vid provtryckning (normalt 50 Pa), Pa
q_l	flöde vid provtryckning (normalt 50 Pa), m ³ /s
q_b	dimensionerande brandflöde, m ³ /s

För fallet med ventilationen i drift kan brandtrycket skattas genom att beskriva tillufts-system och frånluftssystem med drivande över- och undertryck Δp_t respektive Δp_f för ett nominellt ventilationsflöde q_n med nolltryck i lokalen vid normal drift. Tre tryckfall/flödessamband (5.5-7) anges nedan för tillufts-systemet, frånluftssystemet och fasaden med tillhörande flöden och beteckningar q_t , q_f respektive q_l . Brandflödet q_b ändrar detta nolltryck till brandtrycket p_b , vilket minskar tilluftsflödet, ökar frånluftsfödet och skapar ett läckflöde.

$$\Delta p_t - p_b = \Delta p_t (q_t/q_n)^2 \quad (\text{Pa}) \quad (5.5)$$

$$\Delta p_f + p_b = \Delta p_f (q_f/q_n)^2 \quad (\text{Pa}) \quad (5.6)$$

$$p_b = \Delta p_l (q_l/q_n)^2 \quad (\text{Pa}) \quad (5.7)$$

Flödesbalansen mellan inflöde till lokalen och utflöde från lokalen ges av:

$$q_b + q_t = q_f + q_l \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (5.8)$$

Det olinjära ekvationssystemet (5.5-8) kan lösas genom att finna det brandtryck p_b som uppfyller detsamma. Detta görs enkelt med intervallhalvering med startintervallet $(0, \Delta p_t)$ under förutsättning att brandgasspridning inte sker. Det aktuella brandflödet måste vara lägre än gränsfallets brandflöde som kan beräknas genom att sätta p_b lika med Δp_t , vilket ger $q_t=0$ och $q_b = q_f + q_l$.

Det lägsta tillåtna trapphusövertrycket p_{min} kan beräknas genom summering av deluttrycken enligt (5.2), (5.3) och (5.4) eller (5.7) som följer:

$$p_{min} = \Delta p_T + \Delta p_v + p_b \quad (\text{Pa}) \quad (5.9)$$

Notera att om $p_{min} > p_{max}$ kan trycksättning inte användas. Detta kan inträffa dels vid stark vind för en lokal öppen på lovartsidan och dels med en icke tryckavlastad lokal. Tryckavlastning kan dock ske genom fönstersprängning.

Övertrycksintervall för trycksättning med slussar

Det tillåtna intervallet för trapphusövertrycket (p_{min}, p_{max}) kan minst fördubblas genom att använda slussar. En annan fördel med slussar är att trycksättningen inte försvinner när en dörr i en sluss öppnas jämfört med en enkel dörr, om lokalen bakom dörren är tryckavlastad på något sätt.

En sluss gör det möjligt att fördela trapphusövertrycket i två lika delar om slussens två dörrar eller egentligen slussens två dörrsidor har samma läckarea. Två dörrar kan ha något olika läckarea beroende bland annat på variationer i tillverkningen, på hur själva karmen fixerats och tätats och på mindre skador på karm och dörrblad. Två dörrar kan göras ganska lika genom att lägga till en extra läckarea parallellt med varje dörr. Det lägsta tillåtna övertrycket måste dock fördubblas för en sluss med två identiska dörrar för att undvika läckage till slussen.

En alternativ lösning som kan klara stora tryckskillnader är att slussdörrarnas dörrtrycken utformas med någon form av hävstångsverkan. En slussdörr behöver bara öppnas något för hela tryckskillnaden över slussen skall tas upp av den andra stängda slussdörren om utgångsläget är att tryckskillnaden delas lika mellan slussdörrarna. Detta är en udda lösning och funktionssäkerheten kan vara därefter. Det finns inga standardprodukter att använda utan det kräver någon form av produktutveckling.

Antag att dörrarnas tryckförluster är proportionella mot läckarean och flödet upphöjt till en flödesexponent n . Laminära förluster motsvaras av $n=1$ och turbulenta av $n=2$. Om en slussdörr kan öppnas något varvid läckarean ökar en faktor m , kommer tryckförhållandet mellan dörrarna bli $1: m^n$ utgående från $1:1$ före. Ett sifferexempel med ett laminärt fall $n=1$ och $m=4$ som ger förhållandet 1:4 mot 1:1 före. Ett turbulent fall med $n=2$ som ger samma förhållande 1:4 kräver bara en dubblerad öppning med $m=2$.

Ett annat alternativ är att låta dörrtrycket öppna en mindre lucka för att tryckavlasta slussdörren. Denna extra öppning måste vara större än den normala läcköppningen, som för en ståldörr utan tätningslister är omkring 0.005 m^2 . Detta är en liten men påtaglig lucka.

Det finns en nackdel med en brandsluss. Det är att den lätt kan fyllas med brandgaser, när slussdörren intill den brandutsatta lokalen öppnas och den andra slussdörren samtidigt är stängd. Slussrummet blir mer eller mindre en del av den brandutsatta lokalen. Läckageflödet från trapphuset till slussrummet kan inte förhindra att varma brandgaser från lokalen strömmar in överst i slussrummet och fyller slussrummet till samma nivå som i lokalen. Denna form av brandgasspridning godtas dock.

Det finns egentligen inte något behov av att använda en brandsluss till en brandutsatt lokal efter det att utrymningen är avslutad. Detta skall ha skett innan farliga förhållanden börja råda i den brandutsatta lokalen. Brandförsvaret kan givetvis använda brandslussen senare, men brandslussen kommer att brandgasfyllas till samma nivå som i lokalen. Det kommer att ta tid för läckflödet genom brandslussen att ventileras bort brandgaserna. Ett upprepat användande av brandslussen till den brandutsatta lokalen kommer att sprida brandgaser till trapphuset.

8. Bestäm högsta tillåtna trapphusövertryck p_{maxs} (Pa).

Använd högsta tillåtna övertryck enligt (5.1), läckfaktor m och tryckfallflödesexponent för läckor n , vilket ger:

$$p_{maxs} = (m^n + 1) p_{max} \quad (\text{Pa}) \quad (5.10)$$

Notera att för lika dörrar utan hävarmsfunktion eller avlastningslucka är parametern $m = 1$.

9. Bestäm lägsta tillåtna trapphusövertryck p_{mins} (Pa).

Slussdörren närmast en brandutsatt lokal måste trycksättas med en tryckskillnad enligt (5.9). Den andra slussdörren är likadan och därför fördubblas tryckskillnaden över brandslussen.

$$p_{mins} = 2 p_{min} \quad (\text{Pa}) \quad (5.11)$$

Det i steg 8 och 9 här beräknade intervallet för trapphusövertrycket för fallet med slussar (p_{mins}, p_{maxs}) kommer i fortsättningen att anges som det allmänna trapphusövertrycksintervallet för fallet utan slussar (p_{min}, p_{max}).

Trycksättning utan utluftning

10. Undersök trycksättning utan utluftning.

Trycksättning utan utluftning sker med ett förhållandevis litet flöde som är lika med läckflödet. Detta uppåtgående och avtagande flöde skapar försumbara tryckförluster i trapphuset även för ett personbelastat trapphus. Trycksättning med uteluft gör att trapphusluftens temperatur är lika med uteluftens temperatur nederst i trapphuset. Det förhållandevis låga trapphusflödet medför dock att luften högre upp i trapphuset antar trapphusytornas temperatur eller temperaturen som rådde före trycksättningen. Om de små tryckförlusterna och trapphusluftens temperaturavvikelsen försummas, kan den högsta möjliga trappushöjden beräknas som en underskattning med en liten marginal.

$$h_{max} = (p_{max} - p_{min}) / (\rho_u - \rho_i) g \quad (\text{m}) \quad (5.12)$$

Om h_{max} är större än h , är statisk trycksättning möjlig. Notera dock att ett stort läckage och ett rimligt tryckfall kan öka den möjliga trappushöjden något.

Det går också att sektionera trapphuset i n delar som uppfyller $n > h/h_{max}$.

Modellparametrar för trycksättning med utluftning

För att kunna beräkna trapphusets övertrycksprofil, flödesprofil och temperaturprofil i höjddled med modellsambanden (2.1-3) krävs uppgifter på trapphusets specifika läckage, specifika tryckfall, specifika värmeöverföringsförmåga och dimensionerande personbelastning.

11. Bestäm trapphusets specifika läckflöde q_m (m^3/sm).

Trapphusets läckor antas vara jämnt fördelade i höjddled. Trapphusets luftläckage domineras helt av trapphusdörrarnas läckage. En rimlig siffra för en ståddörr utan tätningslister är $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ vid en tryckskillnad om 50 Pa. Detta ger ett specifikt läckage på $20 \text{ l}/\text{sm}^2$ för en dörr, vilket kan jämföras med $1.6 \text{ l}/\text{sm}^2$ för lokaler enligt BBR.

Övrigt läckage bortsett från ventilationsanordningar för trapphuset kan orsakas av olika genomföringar för främst belysning. En rimlig siffra för övrigt läckage är $0.2 \text{ l}/\text{sm}^2$ vid en tryckskillnad om 50 Pa.

Det totala läckaget per våningsplan blir sammantaget högst $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ vid en tryckskillnad om 50 Pa för en dörr per våningsplan, en våningshöjd om 3 m och en trapphusomkrets om 16 m. Det specifika läckaget q_m blir därför mindre än $0.02 \text{ m}^3/\text{sm}$ vid en tryckskillnad om 50 Pa.

12. Bestäm trapphusets specifika tryckfall R ($\text{Pa}/\text{m}(\text{m}^3/\text{s})^2$).

Bestäm trappbredd b_t (m) och fri trapphöjd h_t (m). Den fria trapphöjden är lika med våningshöjden minskad med bjälklagstjockleken. Det nominella strömningstvärsnittet A_t (m^2) ges av produkten mellan trappbredd b_t och fri trapphöjd h_t .

$$A_t = b_t h_t \quad (\text{m}^2) \quad (5.13)$$

Trapphusets tryckfall kan anges med en engångsförlustfaktor per våningsplan e (-) för en viss trapptyp enligt sammanställning från modellförsök nedan.

öppet trapplopp och halvtrappa	$e = 2.5$
öppet trapplopp och heltrappa	$e = 2.9$
slutet trapplopp och halvtrappa	$e = 3.9$
slutet trapplopp och heltrappa	$e = 4.2$

Det specifika tryckfallet R beräknas därefter enligt sambandet nedan.

$$R = e \rho / 2A_t^2 h_v \quad (\text{Pa/m(m}^3/\text{s)}^2) \quad (5.14)$$

A_t	nominellt strömningstvårsnitt, m^2
h_v	våningshöjd, m
ρ	nominell luftdensitet, kg/m^3
e	engångsförlustfaktor per våningsplan, -

Notera att det specifika tryckfallet R enligt (5.14) avtar med ökande trappbredd och våningshöjd. Ett siffervärde för det specifika tryckfallet R för en öppen halvtrappa, våningshöjd 3 m och trappbredd 1.2 m är $0.05 \text{ Pa/m(m}^3/\text{s)}^2$. Ett trapphusflöde om $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ger ett tryckfall på 1.8 Pa/m .

13. Bestäm trapphusets specifika värmeöverföringsförmåga Ah (W/mK).

Beräkna den totala inre trapphusytan A_v (m^2) för väggar, plan och trappor för ett våningsplan med uttrycket nedan. De tre termerna motsvarar väggytor, vågräta trappytor och lodräta trappytor.

$$A_v = 2(l + b)h_v + 2lb + bh_v \quad (\text{m}^2) \quad (5.15)$$

där

b	trapphusets inre bredd, m
h_v	våningshöjd, m
l	trapphusets inre längd, m

Beräkna den specifika värmeöverföringsförmågan Ah (W/mK) med ett antaget konvektivt värmeövergångstal om $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ och en våningshöjd h_v (m) som följer:

$$Ah = 5 A_v/h_v \quad (\text{W/mK}) \quad (5.16)$$

14. Bestäm dimensionerande personbelastnings relativa storlek f - och övergång p -.

En ojämn personbelastning ökar övertryckets variation och begränsar därmed den möjliga trapphushöjden vid trycksättning med utluftning. Det specifika tryckfallet skrivs för fallet utan personbelastning som R och för fallet med personbelastning som fR , där $f > 1$. Fullskaleförsök med hög personbelastning om 2 person/m^2 visade att det specifika tryckfallet fördubblades jämfört med ingen personbelastning, vilket ger $f = 2$. Om antalet personer per våningsplan är litet kan ett fördubblat tryckfall vara i överkant. Den del av trapphuset som används vid utrymning rymmer kanske fler personer än vad det finns personer som skall utrymma.

Om den fria trapphöjden ökas, minskar belastningsfaktorn f eftersom personbelastningen stör en mindre del av strömningstvårsnittet. Omvändningen gäller också, men våningshöjden är sällan under 3 m och därmed är den fria trapphöjden alltid minst 2.7 m.

Det svåraste personbelastningsfallet är en stegbelastning med personbelastning nederst och ingen överst. Stegövergången anges med det relativa läget p och dess dimensionerande värde är en funktion av personbelastningsfaktorn f enligt uttrycken (2.17) under förutsättning att utrymning sker högre upp och att antalet personer räcker till för den antagna personbelastningen.

Den dimensionerande personbelastningens relativa läge p kan därför bestämmas som ett val av lägsta värde för följande tre fall. Notera att lokalen med det största antalet utrymmande personer inte behöver vara dimensionerande utan det kan vara en annan lokal högre upp i byggnaden som kan fylla upp trapphuset till en högre nivå än den större lokalen. Den högsta personbelastningen är satt till 2 personer/m².

$$p = 1/(1 + f^{0.5}) \quad (-) \quad (5.17)$$

$$p = h_u/h \quad (-) \quad (5.18)$$

$$p = Nh_v/2hbl \quad (-) \quad (5.19)$$

där

h_u	höjdnivå för utrymmande lokal, m
h	trapphushöjd, m
N	antal utrymmande personer, -
b	trapphusets bredd, m
h_v	våningshöjd, m
l	trapphusets längd, m

Trycksättning med utluftning

Trycksättning med utluftning kan ske med fast, växlande, styrd eller reglerad utluftning. Alla dessa fyra metoder kan i princip kombineras med brandsluss/trycksluss av något slag, vilket minst fördubblar det tillåtna övertrycksintervallet.

Skillnaden mellan fast och växlande utluftning är ytterst liten. Utluftningen öppnas i det växlande fallet när utetemperaturen går under en given gräns.

Den styrda utetemperaturberoende utluftningen kan göras identisk med den reglerade utluftningen för ett givet personbelastningsfall. Utformningen av den styrda utluftningen kan vara svårare att åstadkomma än den reglerade utluftningen. Det finns därför praktiskt sett bara två utluftningsfall att undersöka nämligen växlande och reglerad utluftning.

15. Överslagsberäkna lägsta trapphusövertryck för reglerad trycksättning.

Använd beräkningsuttrycken iterativt (3.1-12) med framtagna modellparametrar q_m, R, f, p och Ah i steg 11-14, givet övertryck nederst och överst och dimensionerande uteklimat.

Om det beräknade lägsta trapphusövertrycket ligger klart över det lägsta tillåtna trapphusövertrycket är det möjligt att välja enklare trycksättning med fast, växlande eller styrd utluftning utan reglering av trapphustrycket överst.

Om det beräknade lägsta trapphusövertrycket ligger klart under det lägsta tillåtna trapphusövertrycket är det inte möjligt att trycksätta trapphuset.

16. Överslagsberäkna en effektiv utluftningsarea A_o .

Denna area kan användas som ett utgångsvärde för att prova fram trycksättning med fast, växlande och styrd utluftning. Den effektiva utluftningsarean A_o beräknas med antagande om fri utströmning vid tryckskillnaden p_{max} , vilket bestämmer utströmningshastigheten.

$$A_o = q_o / (2p_{max}/\rho)^{0.5} \quad (\text{m}^2) \quad (5.20)$$

Utluftningsflödet q_o överst kan skattas med det nominella balansflödet q_b och läckflödet q_x som:

$$q_o = q_b - q_x/2 \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (5.21)$$

$$q_b = ((\rho_u - \rho_i)g/R)^{0.5} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (5.22)$$

$$q_x = q_m h \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (5.23)$$

17. Undersök trycksättning med fast utluftning.

Utluftningen öppnas vid trycksättning oberoende av utetemperatur. Notera att injustering/kontroll av funktionen krävs eftersom trapphusövertrycket överst inte regleras.

Simulera modellen enligt (2.1-3) för olika uteklimat med här framtagna modellparametrar q_m, R, f, p och Ah i steg 11-14, givet övertryck nederst och en effektiv utluftningsarea A_o . Prova även minimal och maximal personbelastning motsvarande $p = 0$ respektive $p = 1$.

Om övertrycksintervallet överskrids, prova andra värden på den effektiva utluftningsarean A_o eller prova nästa metod.

18. Undersök trycksättning med växlande avluftning.

Utluftningen öppnas vid trycksättning under en given utetemperatur. Notera att injustering/kontroll av funktionen krävs eftersom trapphusövertrycket överst inte regleras.

Simulera modellen enligt (2.1-3) för olika uteklimat med här framtagna modellparametrar q_m , R , f , p och Ah i steg 11-14, givet övertryck nederst, en effektiv utluftsarean A_o och en vald växlingstemperatur. Prova även minimal och maximal personbelastning motsvarande $p = 0$ respektive $p = 1$. Jämför även med tillämpningsexempel i avsnitt 4 Figur 4.7-9 och Tabell 4.3.

Om övertrycksintervallet överskrids, prova andra värden på den effektiva utluftsarean A_o och växlingstemperaturen eller prova nästa metod.

19. Undersök trycksättning med styrd avluftning.

Utluftningen öppnas efter en given utetemperaturberoende funktion. Notera att injustering/kontroll av funktionen krävs eftersom trapphusövertrycket överst inte regleras.

Simulera modellen enligt (2.1-3) för olika uteklimat med här framtagna modellparametrar q_m , R , f , p och Ah i steg 11-14, givet övertryck nederst och en uteklimatberoende effektiv utluftsarean A_o . Prova även minimal och maximal personbelastning motsvarande $p = 0$ respektive $p = 1$. Jämför även med tillämpningsexempel i avsnitt 4 Figur 4.4-6 och Tabell 4.2.

Om övertrycksintervallet överskrids, prova andra värden på den uteklimatberoende och effektiva utluftsarean A_o eller prova nästa metod.

20. Undersök trycksättning med reglerad avluftning.

Simulera modellen enligt (2.1-3) med här framtagna modellparametrar q_m , R , f , p och Ah i steg 11-14, givet övertryck nederst och överst och olika uteklimat.

Om övertrycksintervallet överskrids och det tillåtna övertrycksintervallet inte kan ökas måste trapphuset sektioneras i höjddled. En halvering av trapphushöjden kan vara tillräckligt för att trycksättning med utluftning skall klara funktionen. Antalet nödvändiga trapphussektioner har tidigare beräknats för trycksättning utan utluftning, i steg 10. Jämför även med tillämpningsexempel i avsnitt 4 Figur 4.1-3 och Tabell 4.1.

Notera att någon injustering/kontroll av funktionen inte krävs i detta utluftsfall om kapaciteten är tillräcklig.

Dimensionering av trycksättningsfläkt och utluftning

21. Val och reglering av trycksättningsfläkt.

Tryckregleringen skall kunna ge ett trapphusövertryck nederst i trapphuset i intervallet (p_{min}, p_{max}) för flödeskrav enligt nedan.

Fallet utan utluftning kräver ett inflöde till trapphuset i $(q_x(p_{min}), q_x(p_{max}))$.

Fallet med utluftning kräver ett inflöde till trapphuset i $(q_x(p_{min}), q_b + q_x(p_{max})/2)$.

Möjliga reglersätt är strypning, bypass, ledskenor eller varvtalsreglering. Driftsekonomi har ingen betydelse. Strypreglning brukar ha den lägsta kostnaden. Bypassreglering kräver samma spjäll och en förbigång. Det låga utgående trycket passar bättre för en radialfläkt med fläkthjul med bakåtböjda skovlar än en med framåtböjda skovlar.

Varvtalsreglering kan vara något långsam på grund av motorns begränsade drivmoment i förhållande till det sammanlagda tröghetsmomentet för fläkten och drivmotorn.

Om utluftningen är reglerad finns det risk för att de två reglerkretsarna för tryckhållning nederst och överst i trapphuset kan störa varandra. Tryckförändringar fortplantas med ljudhastigheten uppåt och neråt i trapphuset. En enkel lösning är att göra den övre tryckregleringen mycket snabbare än den nedre tryckregleringen.

22. Val och utformning av utluftningssystem.

Den reglerade utluftningen skall kunna ge ett trapphusövertryck i (p_{min}, p_{max}) och klar av ett utflöde från trapphuset i $(0, q_b - q_x(p_{max})/2)$.

Utluftnings avslutning mot det fria måste göra okänslig för vind.

Konstantryckhållningsdon kan vara ett sätt att lösa den reglerade utluftningen.

Funktionskontroll av trycksättning

Själva trycksättningens funktion bör kontrolleras utan personbelastning och under vinterförhållanden. Trycksättning med utluftning krävs egentligen först när trapphushöjden h_{max} enligt (5.12) för den rådande utetemperaturen är mindre än den aktuella trapphushöjden h .

Vad som bör mätas är tryckskillnaden mellan trapphus och våningsplan överst, mittpå och nederst, men även mellan våningsplan och omgivning. Den senare tryckskillnaden skall vara liten, men om balansen mellan tilluft och frånluft är dålig kan tryckskillnaden bli påtaglig.

Den normala ventilationen av byggnaden körs på det sätt som trycksättningen förutsätter. Det finns flera driftsätt för den normala ventilationen av byggnaden vid brand i byggnaden. Det kan också finnas särskild brandventilation.

Det är ganska lätt att mäta igenom ett antal fall eftersom alla tryck och flöden i en byggnad snabbt antar sina jämviktsvärden. Ett undantag är dock att trapphustemperaturen påverkas av inflödets utetemperatur. Det är också bra att mäta flera fall för att kunna reda ut om något inte är som förväntat. Några mätfall är följande:

Ingen trycksättning och ingen ventilation
Ingen trycksättning och normal ventilation
Ingen trycksättning och brandventilation

Trycksättning och ingen ventilation
Trycksättning och normal ventilation
Trycksättning och brandventilation

Kontrollmätning kan också ske av följande detaljer:

en arbetspunkt på fläktkurvan för trycksättningsfläkten
inluftningens tryckfall och flöde
utluftningens tryckfall och flöde med fullt öppet spjäll

6 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

Fagergren, Tomas och Jensen, Lars (2000)
Ny trycksättningsmetod i trapphus för utrymning
Energi & Miljö 3/2000

Jensen, Lars (1999)
Konstantrycksättning av trapphus för utrymning
TABK--99/7054

Jensen, Lars (2001)
Stairwell flow pressurization
International Conference on Engineered Fire Protection Design
11-15 June 2001 San Fransisco, CA

Jensen, Lars (2002a)
Stairwell flow pressurization - a new method
TABK--02/7060

Jensen, Lars (2002b)
Maximal stairwell height for different pressurization methods
TABK--02/7061

Jensen, Lars (2002c)
Stairwell flow pressurization with outdoor air as inlet air
TABK--02/7062

Jensen, Lars (2003)
Stairwell flow pressurization - a new method
Journal of Fire Protection Engineering
pp 251-274, Volume 13 Number 4, 2003

Jensen, Lars (2004)
Föredrag och trycksättning av trapphus
BRANDFORSK infodag 2004-11-11

Jensen, Lars (2005a)
Tryckfall i trapphus - Modellförsök
TVIT--05/7001

Jensen, Lars (2005b)
Täthet och tryckfall i trapphus - Fullskaleförsök
TVIT--05/7002

Jensen, Lars (2005c)
Trycksättning av trapphus med personbelastning
TVIT--05/7003

Klote, J. H. and Milke, J. A. (1992)
Design of Smoke Management Systems
ASHRAE

Miller, D.S. (1978)
Internal flow systems
BHRA Fluid Engineering

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