LUND UNIVERSITY

Tryckförhållanden i SFR-tunnelsystem vid driftstörningar

Jensen, Lars

2007

Link to publication

Citation for published version (APA):
Jensen, L. (2007). *Tryckförhållanden i SFR-tunnelsystem vid driftstörningar*. (TVIT; Vol. TVIT-7015). Avd Installationsteknik, LTH, Lunds universitet.

Total number of authors:
1

General rights
Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.
• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

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

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

LUND UNIVERSITY

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

Download date: 19. Dec. 2025

Tryckförhållanden i SFR-tunnel-system vid driftstörningar

Uppdrag för SKB, Svensk Kärnbränslehantering AB

Lars Jensen

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet, 2007
Rapport TVIT--07/7015

Lunds Universitet

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

Avdelningen för installationsteknik

Avdelningen för Installationsteknik tillhör institutionen för Bygg- och miljöteknologi på Lunds Tekniska Högskola, som utgör den tekniska fakulteten vid Lunds Universitet. Installationsteknik omfattar installationernas funktion vid påverkan av människor, verksamhet, byggnad och klimat. Forskningen har en systemanalytisk och metodutvecklande inriktning med syfte att utforma energieffektiva och funktionssäkra installationssystem och byggnader som ger bra inneklimat.
Nuvarande forskning innefattar bl a utveckling av metoder för utveckling av beräkningsmetoder för godtyckliga flödessystem, konvertering av direktelvärmda hus till alternativa värmesystem, vädring och ventilation i skolor, system för brandsäkerhet, alternativa sätt att förhindra rökspridning vid brand, installationernas belastning på yttre miljön, att betrakta byggnad och installationer som ett byggnadstekniskt system, analysera och beräkna inneklimatet i olika typer av byggnader, effekter av brukarnas beteende för energianvändning, reglering av golvvärmesystem, bestämning av luftflöden i byggnader med hjälp av spårgasmetod. Vi utvecklar även användbara projekteringsverktyg för energi och inomhusklimat, system för individuell energimätning i flerbostadshus samt olika analysverktyg för optimering av ventilationsanläggningar hos industrin.

Tryckförhållanden i SFR-tunnel-system vid driftstörningar

Uppdrag för SKB, Svensk Kärnbränslehantering AB

Lars Jensen

© Lars Jensen, 2007

ISRN LUTVDG/TVIT--07/7015--SE(31)

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

Innehållsförteckning

1 Inledning 5
Ventilationsteknisk störning 5
Brandteknisk störning 6

2 Principanalys av driftstörningar 7
Två seriekopplade system 7
Fler än två seriekopplade system 8
Andra tryckfallsfunktioner 10
Fläktkurvans betydelse 10
Mellantryck skilt från nolltryck 10
Parallellkopplade system 11

3 Analys av system 744 utbyggnadsdelen 15
Tillämpning på system 744 utbyggnadsdelen 20
Resultat för system 744 utbyggnadsdelen 20
Åtgärdsförslag för system 744 utbyggnadsdelen 21

4 Analys av system 743 driftdelen 23
Resultat för system 743 driftdelen 25

5 Analys av brandflöde för en tunnelbrand 27

1 Inledning

SFR står för slutförvar för radioaktivt driftavfall. Låg- och mellanaktivt avfall skall slutförvaras i anläggningen. Driftavfallet kommer från de svenska kärnkraftverken, industri, sjukvård och forskning. Något använt kärnbränsle lagras inte i SFR. Anläggningen ligger under mark vid Forsmarks kärnkraftverk.

SFR-komplexet är uppdelat i två tunnelsystem, ett för drift och ett för utbyggnad. De två systemen benämns 743 respektive 744. Båda systemen har egna av varandra oberoende ventilationssystem, vilka är likartade med stora huvudfläktar placerade på markplan för att tillföra och bortföra luft från tunnelsystemen och anslutna undermarksanläggningarna. Principen för driftdelen, system 743, med sexton fläktar redovisas i Figur 1.1. Utbyggnadsdelen, system 744, är mycket enklare och har endast tre fläktar.

Uppdragets uppgift är att undersöka hur stora tryckändringar som kan uppstå mellan driftdelen och utbyggnadsdelen vid plötsliga driftstörningar, vilka exemplifieras nedan.

Ventilationsteknisk störning

De ventilationstekniska störningar som kan inträffa är bortfall av fläkts motordrift, lagerhaveri för fläktmotor (direktdrivet fläkthjul), fläkts skovelvinkel ändras genom reglering och avstängningsspjäll stängs eller öppnas. När en störning inträffar, kommer störningen att fortplanta sig med högst ljudets hastighet genom ventilations- och tunnelsystem och tryck- och flödesförhållanden ändras.

En principanalys av driftstörningar görs i avsnitt 2 för ett antal fall med olika antal fläktar, vilka är serie- eller parallellkopplade. Ett stort antal fall med olika fläktbortfall, läckage och brandfall räknas igenom och redovisas i avsnitt 3 för utbyggnadsdelen, system 744. Driftdelen, system 743, analyseras i avsnitt 4.

Hastighetsändringar i flödessystem medför tryckslag, om ändringstiden är kortare än dubbla gångtiden för ljudhastigheten i den ledningsträcka som påverkas mest. Tryckändringen för tryckslag i luft är proportionellt mot hastighetsändringen och kan beräknas till 400 Pa för en hastighetsändring på 1 m/s. Tvärstopp för hastigheten 20 m/s ger ett tryckslag på 8000 Pa. Kanalsystem i plåt kan skadas av en sådan tryckbelastning. Huvudkanalerna i system 743 är i betong. System 744 har endast en vävtub och inget annat kanalsystem.

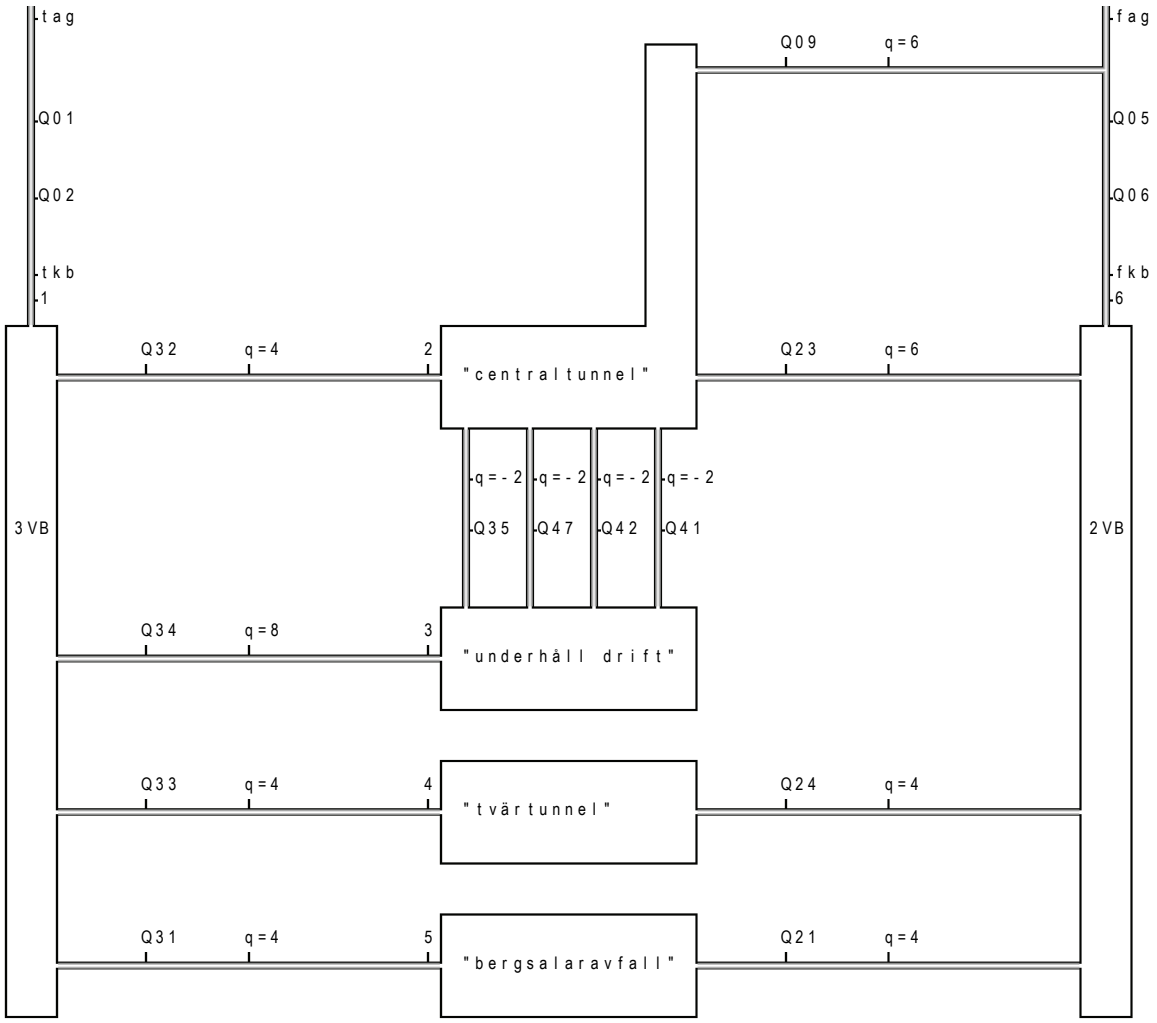
Tryckslag kommer inte att behandlas i denna rapport utan endast olika tryckändringar mellan normal drift och fall med någon driftstörning kommer att behandlas. Övergången däremellan bedöms ske utan risk för stora tryckslag. Det finns en viss dämpning och utjämning genom fläktarnas roterande massor och ställdons långa gångtider. Den normala driften är kontinuerlig och ökning eller minskning av ventilationsflöden sker genom långsam ändring av huvudfläktarnas skovelvinklar och inte momentant med risk för tryckslag.

Brandteknisk störning

Branden stör ett ventilationssystem på två sätt. Det ena är att brandeffekten får lokalluften att expandera, vilket i det ideala fallet är nästan 3 m^3/s per tillförd MW. Detta kan inträffa för vätskebränder med nästan momentan konstant effekt. En tumregel för det största brandflödet i normala lokaler är att 1 MW brandeffekt skapar ett brandflöde på 1 m^3/s. Bergrumsanläggningar är ofta mycket stora lokaler och väggarnas avkylning är betydande. En brandeffekt på 20 MW eller 100 MW kan resultera i ett brandflöde på 8 respektive 20 m^3/s beräknat för ett rum med golvytan 12000 m^2 och rumshöjden 6 m, vilket redovisas i avsnitt 5.

Den andra effekten är att den uppvärmda lokalluften skapar termiska tryckskillnader i vertikalled. Den aktuella bergrumsanläggningen ligger 80 m under marknivå och en fullständig uppvärmning till 300 ºC ger en termisk gradient på omkring 6 Pa/m och totalt 480 Pa.

En fördel med de redovisade brandtekniska störningarna är att de inte är momentana. Det finns därför tid för att genomföra olika åtgärder för att tryckavlasta branden och ventilera bort värmen.



Figur 1.1 Principskiss för system 743 driftdelen med namngivna fläktar och angivna flöden.

2 Principanalys av driftstörningar

Tryckändringar i ventilationssystem med flera seriekopplade delsystem vid bortfall en fläkt i ett delsystem kan uppskattas väl genom att göra en del förenklande antaganden. Ett delsystem kan vara ett tilluftsystem och ett annat delsystem kan vara ett frånluftsystem.

Varje delsystem har en fläkt med samma tryckstegring som delsystemets tryckfall vid nominellt flöde. Varje fläkt beskrivs med en högsta tryckstegring vid nollflöde och att fläktkurvan faller kvadratiskt med ökande flöde. Alla tryckfall är kvadratiska. Varje delsystem kan därför beskrivas med en ideal tryckstegring och ett lika stort tryckfall vid nominellt flöde. Detta innebär att trycket mellan delsystemen är lika med det yttre omgivande trycket. Dessa mellanliggande tryck motsvarar i regel någon form av lokal.

Det nominella flödet genom alla seriekopplade delsystem antas vara normaliserat till ett.

Två seriekopplade delsystem

Normal drift och störfall redovisas i Figur 2.1. Antag att två delsystems tryckstegring är *a* och *b*. Flödet relativt det nominella flödet kan vid bortfall av fläkt i delsystem a beräknas till:

$$q_a = (b/(a+b))^{0.5} \qquad (-) \qquad (2.1)$$

Trycket mellan delsystem a och b kan i sin tur beräknas som tryckfallet från inlopp med nolltryck till mellanpunkten ab:

$$p_{ab} = - a\, q_a^2 = - ab/(a+b) \qquad (-) \qquad (2.2)$$

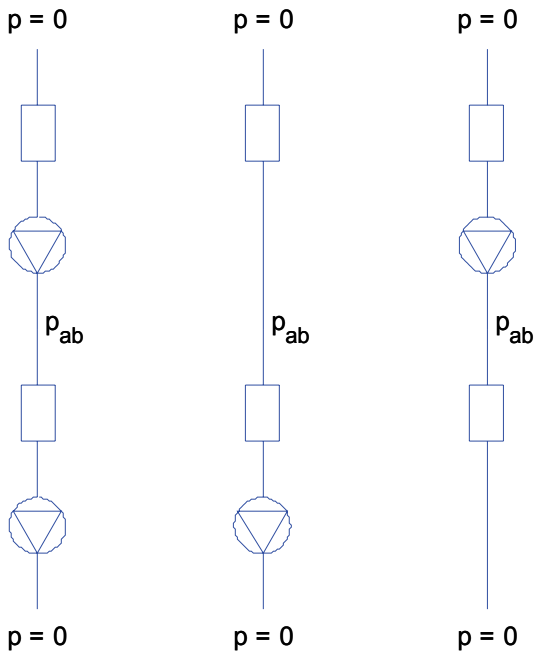
Bortfall av fläkt i delsystem b ger följande flöde relativt det nominella flödet och mellantryck beräknat som tryckfall från punkten ab till utlopp med nolltryck:

$$q_b = (a/(a+b))^{0.5} \qquad (-) \qquad (2.3)$$

$$p_{ab} = b\, q_b^2 = ab/(a+b) \qquad (-) \qquad (2.4)$$

Flödena q_a och q_b för de två fallen är olika om delsystemen a och b är olika. Tryckändringen är dock den samma oberoende av delsystemens tryckstegring eller tryckfall.

Den största möjliga tryckändring som kan inträffa kan undersökas. Totaltryckfallet normaliseras till ett d v s $a+b=1$. Största tryckändring bortsett från tecken är då ab, vilket även kan skrivas som $a(1-a)$. Maximum fås för $a=0.5$, vilket ger en relativ tryckändring på 0.25 i förhållande till det totala tryckfallet inberäknat fläktkurvans tryckfall för alla delsystem.



Figur 2.1 Två seriekopplade system – normal drift och drift med störning

Fler än två seriekopplade delsystem

Om ett av de två yttersta delsystemen faller ifrån kan övriga intakta system slås samman till ett intakt delsystem. Problemet är nu identiskt med det tidigare beskrivna med endast två delsystem. Den största tryckändringen kan bestämmas och proportioneras ut efter tryckstegrings- eller tryckfallsandel inom den intakta delen.

Fallet med bortfall av ett inre delsystem kan förenklas till ett fall med tre delsystem varav två intakta ytterst och ett fallerande innerst. Normalfall och störfall redovisas i Figur 2.2. De tre delsystemen benämns a, b och c med motsvarande tryckstegring och tryckfall.

Flödet relativt det nominella flödet kan vid bortfall av delsystem b beräknas som:

$$q_b = ((a+c)/(a+b+c))^{0.5} \quad (-) \qquad (2.5)$$

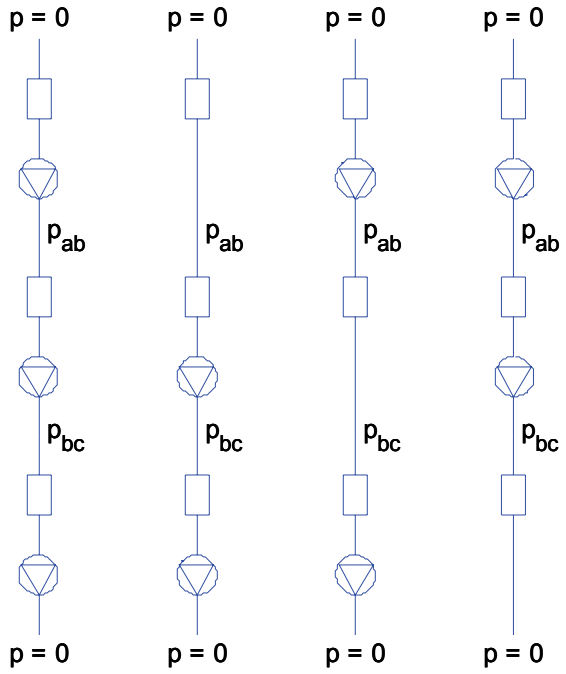
Trycket mellan delsystem a och b kan i sin tur beräknas som:

$$p_{ab} = a - a\, q_b^2 = a - a(a+c)/(a+b+c) = ab/(a+b+c) \quad (-) \qquad (2.6)$$

Trycket mellan delsystem b och c kan i sin tur beräknas som:

$$p_{bc} = c\, q_b^2 - c = c(a+c)/(a+b+c) - c = -\, bc/(a+b+c) \quad (-) \qquad (2.7)$$

Om delsystem a och c är identiska blir ändringen i mellantryck lika stor bortsett från tecken.



Figur 2.2 Tre seriekopplade system – normal drift och drift med störning

Uttrycket (2.6) för p_{ab} kan även härledas från (2.2) genom att slå samman system a och c, vilket ger en tryckändring:

$$p_{(a+c)b} = (a+c)b/((a+c)+b) \qquad (-) \qquad (2.8)$$

Den sökta tryckändringen p_{ab} fås som en proportionell del av $p_{(a+c)b}$ på formen:

$$p_{ab} = (a/(a+c))\, p_{(a+c)b} = ab/(a+b+c) \qquad (-) \qquad (2.9)$$

Den sökta tryckändringen p_{bc} fås som en proportionell del av $p_{(a+c)b}$ med ombytt tecken på formen:

$$p_{bc} = -\,(c/(a+c))\, p_{(a+c)b} = -\,bc/(a+b+c) \qquad (-) \qquad (2.10)$$

För tre delsystem med ett inre fallerande delsystem b blir den största tryckändringen absolut sett *ab* eller *bc* för ett normaliserat fall med $a+b+c=1$. Extremfallet är om $c=0$ fås $ab=0.25$ eller om $a=0$ fås $bc=0.25$, som för fallet med två delsystem.

Om alla delsystem är lika d v s $a=b=c=1/3$ fås de relativa tryckändringarna 1/9 respektive -1/9 vid bortfall av delsystem b. Bortfall av delsystem a ger de relativa tryckändringarna -2/9 respektive -1/9 och omvänt med bortfall av delsystem c fås 1/9 respektive 2/9.

Andra tryckfallsfunktioner

Resultatet blir det samma även om tryckfallet inte är kvadratiskt. Antag att sambandet mellan tryckfall Δp och flöde q är $\Delta p \sim q^n$. Exponenten 0.5 i formlerna (2.1), (2.3) och (2.5) motsvaras av $1/n$ där $n=2$ för kvadratiskt tryckfall. Exponenten 2 i formlerna (2.2), (2.4), (2.6) och (2.7) är just flödesexponenten n. Faktorn q^n kan skrivas som $((abc)^{1/n})^n = abc$ och är helt oberoende av flödesexponenten och parametern n. Slutsatsen är att resultatet är oberoende av tryckfallets flödesberoende.

Fläktkurvans betydelse

Tryckändring vid bortfall av en fläkt kan beräknas formlerna (2.2) och (2.4) för yttre delsystem och med (2.6) och (2.8) för ett inre delsystem. Siffermässigt påverkar fläktkurvans form tryckändringen. Detta kan visas enkelt för samma fall med två lika delsystem och med ett tryckfall på 1000 Pa.

Om fläktkurvan har en konstant tryckstegring på 1000 Pa oberoende av flödet, vilket delvis motsvarar en radialfläkt med framåtböjda skovlar, gäller att $a=b=1000$ Pa och tryckändringen blir 500 Pa.

Om fläktkurvans tryckstegring är 200 Pa lägre i arbetspunkten än i den dämda punkten med nollflöde gäller att $a=b=1200$ Pa och tryckändringen blir 600 Pa.

En arbetspunkt 500 Pa lägre än den dämda punkten ger $a=b=1500$ Pa och en tryckändring på 750 Pa.

Det är viktigt att skilja på tryckstegring och tryckfall vid normal drift och modellparametrarna a, b och c som även tar hänsyn till fläktkurvans form för varje delsystem.

Mellantryck skilt från nolltryck

Trycket mellan två delsystem behöver inte vara lika med nolltrycket eller omgivningens tryck. Ett mindre över- eller undertryck kan vara ett sätt att uppnå en viss skyddsfunktion. En enkel analys skall göras för ett fall med två delsystem a och b. Mellantrycket ges av parametern d och delsystemens tryckfall ges av parametrarna a och b som tidigare. Motsvarande tryckstegringar ges av $a+d$ respektive $b-d$. Mellantrycket kan före och efter bortfall fläkt i delsystem a och b beskrivas som:

$p_{ab} = d$	normal drift	(Pa)	(2.11)
$p_{ab} = -a(b-d)/(a+b)$	utan fläkt a	(Pa)	(2.12)
$p_{ab} = (a+d)b/(a+b)$	utan fläkt b	(Pa)	(2.13)

Ändringen i mellantryck kan skrivas som skillnader mellan (2.11-13). Resultatet kan skrivas som följer uppdelat i två termer som är ändringen i mellantryck enligt (2.2) och (2.4) för mellantryck lika med nolltryck och för mellantryck skilt från noll:

$$dp_{ab} = - ab/(a+b)+bd/(a+b) \qquad \text{utan fläkt a} \quad \text{(Pa)} \qquad (2.14)$$

$$dp_{ab} = ab/(a+b)+ad/(a+b) \qquad \text{utan fläkt b} \quad \text{(Pa)} \qquad (2.15)$$

Inverkan av ett normalt mellantryck skilt från noll är litet eftersom de två parametrarna *a* och *b* är flera gånger större än parametern *d*. Ett symmetriskt fall med *a=b* innebär att halva det normala mellantrycket *d* finns kvar vid en störning utöver grundändringen enligt (2.2) eller (2.4) lika med den första termen i (2.14) och (2.15).

Parallellkopplade system

En enkel analys skall genomföras för ett fall som redovisas i Figur 2.3 med två parallella system med ett tredje system i serie. Detta fall kan även ändras till flera parallella system och flera system i serie. Bortfall skall undersökas för ett av de parallella systemen, vilket kan vara bortfall av fläkt som visas i Figur 2.4 eller bortfall med avstängning som visas i Figur 2.5.

Fallet med enbart bortfall av fläkt kan inte lösas analytiskt utan numeriskt och den relativa tryckändringen p_{ab}/a redovisas i Figur 2.6 som ett isodiagram med relativt flöde *q* för system som fallerar som x-axel och med tryckfallskvoten *b/a* som y-axel. Ett exempel med *a=b* eller *a/b=1* och *q=0.5* ger att p_{ab}/a är omkring 0.3. Flöde och tryckändring med bortfall och avstängning kan beräknas som följer:

$$q = [\, a /(a + b /(1-q)^2)]^{0.5} \qquad \text{(-)} \qquad (2.16)$$

$$p_{ab} = a - a^2 /[\, a + b /(1-q)^2 \,]^{0.5} \qquad \text{(-)} \qquad (2.17)$$

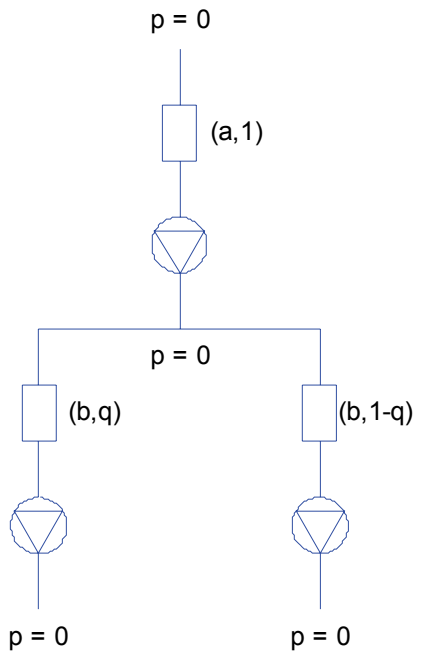
Den relativa tryckändringen redovisas i Figur 2.7 på samma sätt som i Figur 2.6. Samma sifferexempel som tidigare med *a/b=1* och *q=0.5* ger att p_{ab}/a är omkring 0.8. En större tryckändring var väntad för detta fall jämfört med föregående.

Om det finns seriekopplade system före och efter de parallellkopplade systemen, kan tryckändringen beräknas för ett fall med alla seriekopplade system sammanslagna, vilket blir lika med det fall som analyserats.

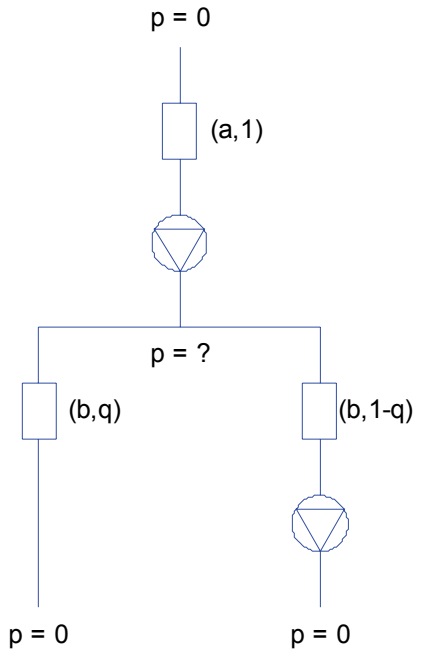
Utgå från ett fall med ett system före och ett system efter de parallella systemen. Tryckfallet för de tre delarna antas vara *a*, *b* och *c*. De två seriekopplade systemen sammanförs till ett system med tryckstegringen *a+c* och tryckändringen p_{ab} bestäms med diagram i Figur 2.6 eller 2.7. De sökta tryckändringarna p_{ab} och p_{bc} skalas fram från $p_{(a+c)b}$ med faktorn *a/(a+c)* för p_{ab} och med faktorn *c/(a+c)* för p_{bc} med ombytt tecken.

$$p_{ab} = (a/(a+c))\, p_{(a+c)b} \qquad \text{(-)} \qquad (2.18)$$

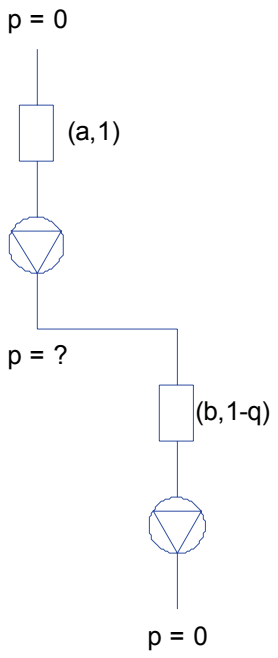
$$p_{bc} = - (c/(a+c))\, p_{(a+c)b} \qquad \text{(-)} \qquad (2.19)$$



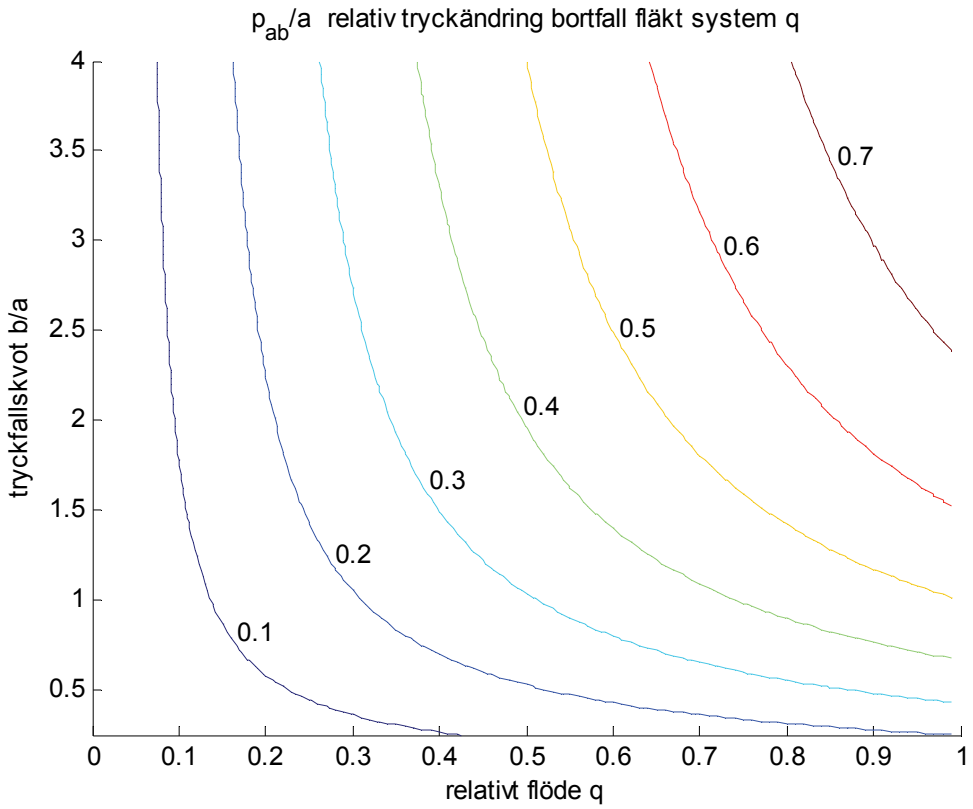
Figur 2.3 Serie- och parallellkopplade system med normal drift.



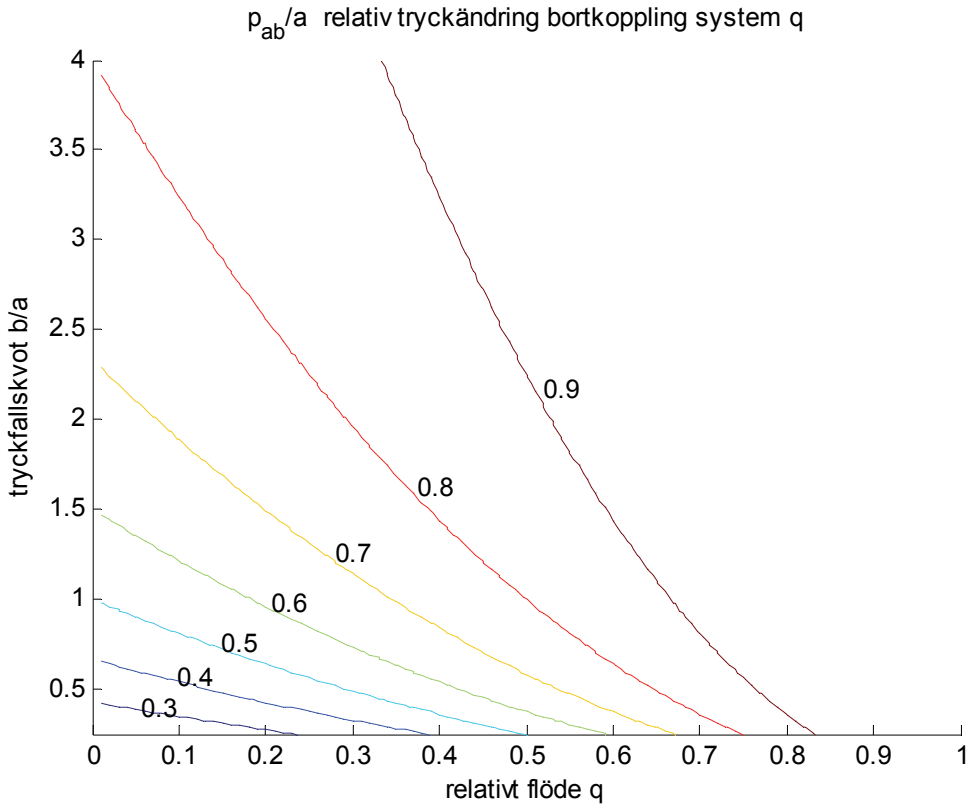
Figur 2.4 Serie- och parallellkopplade system med bortfall av ett delsystems fläkt.



Figur 2.5 Serie- och parallellkopplade system med bortfall och avstängning av ett delsystem.



Figur 2.6 Tryckkvot p_{ab}/a som funktion av relativt flöde q och tryckkvot b/a vid fläktbortfall.



Figur 2.7 Tryckkvot p_{ab}/a som funktion av relativt flöde q och tryckkvot b/a vid avstängning.

3 Analys av system 744 utbyggnadsdelen

Byggtunneln med ventilationssystem 744 har tre stora fläktar betecknade Q1, Q2 och Q3, vilka vid stopp kan orsaka plötsliga tryckändringar. Övriga fläktar i byggtunnelsystemet kan inte påverka trycket i byggtunnelns huvudgångar. De två tilluftsfläktarna Q1 och Q2 arbetar i serie och skall klara tryckfall för filter, återvinning, värmebatteri och en vävtub med längden 1600 m och diametern 1600 mm. Frånluftsfläkten Q3 tar luft innanför porten och arbetar bara med återvinning utan filter.

Övergång från ett injusterat fall med 20 m^3/s tilluft och frånluft till tre störningsfall, vilka kan skrivas med namngivna drivande fläktarna (Q2,Q3), (Q3) och (Q1,Q2). Detta motsvarar bortfall av fläktar (Q1), (Q1,Q2) och (Q3). Bortfall av en fläkt ger upphov till en tryckändring.

Bortfall av tilluft ger ett stort undertryck i lokalen. Bortfall av frånluft ger ett lika stort övertryck i lokalen. Kvarvarande fläkt eller fläktar i drift antas ha oförändrad tryckstegring oberoende av flödet. Det som skiljer är det kvarvarande ventilationsflödet som är olika för de två fallen, om fläktarnas tryckstegring är olika. Bortfall av tilluftsdelens fläktar eller frånluftsdelens fläktar leder till samma ändring i tryck i lokalen som ventileras. Detta trots att tilluftsdelen tryckfall och fläkttryckstegring är högre än för frånluftsdelen. Detta har visats tidigare i avsnitt 2.

Ett idealiserat sifferexempel med 1000 Pa tilluftstryckfall och 500 Pa frånluftstryckfall ger övertrycket 667 Pa vid bortfall av frånluft och 667 Pa undertryck vid bortfall av tilluft. Om normalflödet är 1 m^3/s blir flödet 0.577 m^3/s vid bortfall av tilluft (tryckfall 1500 Pa och drivning 500 Pa ger flödet $(500/1500)^{0.5}$ m^3/s) och 0.816 m^3/s vid bortfall av frånluft (tryckfall 1500 Pa men drivning 1000 Pa ger flödet $(1000/1500)^{0.5}$ m^3/s).

En enkel och självklar slutsats som kan dras från detta exempel är att tryckändringen i lokalen inte kan bli större än fläktarnas tryckstegring. Denna kunskap kan användas för att göra en enkel uppskattning av den största möjliga tryckändringen som kan inträffa.

Tryckfallet för filter, återvinning och värmare för tilluftsidan har antagits vara 1410 Pa vid 20 m^3/s och 1070 Pa för frånluftsidan vid samma flöde. Fläktarna har anpassats för att ge flödet 20 m^3/s. Beräkningar har skett med datorprogrammet PFS. Problembeskrivningen för injusteringen visas med en halvgrafisk principskiss i Figur 3.1 och resultatet i Figur 3.2.

Principen är att grafiken beskriver olika flödesvägar, vars egenskaper beskrivs med anslutna texter. Resultatet skiljer sig endast från indata genom att ett flertal utskrifter har tillkommit, där :h, :q, :v och :t anger utskrift av tryckändring, flöde, hastighet respektive tryck. Alla utskrifter följer en enkel teckenkonvention som anger att positivt är åt höger för horisontella textelement och neråt för vertikala textelement.

Alla fläktar som har namn FC har samma fläktkurva motsvarande en skovelvinkel på 50 º och definieras med en fan-rad med tre tryckstegring/flödespar på fläktkurvan för en given skovelvinkel. De tre fläktarnas normala pådrag är n1, n2 och n3 tidigare bestämda i Figur 3.1-

2 och de anges som första argument efter fläktbeteckningen FC. Andra argumenten som gäller för störfallet anges här med parametrarna a, b och c för att skilja de tre fläktarnas pådrag med värdet för normal drift något avrundade n1=0.7, n2=0.7 och n3=0.8 och 0 för bortfall.

Läckaget kring byggporten har stor betydelse för trycket i byggtunneln. Det finns en glipa under porten och mellan portbladen. Den effektiva läckarean anges med parametern A och kan sättas till 0.1 m^2. Två andra läckareor har också testats, nämligen 1 och 10 m^2.

De fyra fläktfallen kombineras med tre olika effektiva läckareor på 0.1 (den normala), 1 och 10 m^2 och ett normalfall och ett brandfall med ett brandflöde på 20 m^3/s. Denna störning anges med parametern q. Detta ger totalt tjugofyra fall. Problembeskrivningen för de tjugofyra störfallen redovisas med en halvgrafisk principskiss i Figur 3.3 och resultatet för kontroll av normal drift i Figur 3.4 och störfallen i Figur 3.5. Alla normaldriftfallen är identiska.

Alla resultatutskrifter med :w är numrerade i grafiken och har sorterats upp i grupperna ändring av tryck, flöde och hastighet. Resultat nummer 8 är det sökta kritiska trycket i byggtunneln. De tjugofyra beräkningsfallen är också numrerade med step-rader. Fall 2 eller step 2 är värsta normalfallet med ett undertryck på 657 Pa vid stopp av både Q1 och Q2. Notera att fall 3 nästan ger samma övertryck på 649 Pa. Fall 15 är det värsta störfallet med bortfall av frånluft och ett övertryck på 1808 Pa. Störfall med bortfall av tilluftsdelen, fall 14, har oförändrat tryck, eftersom störflödet är lika stort som det nominella tilluftsflödet. Fall 16 med störflöde och normal drift har ett övertryck på 1333 Pa.

```
begin
format   o 1  p 0  q 1
control  duct=1
fan      FC  2000:15 1400:30  0:50

   FC?          FC,0.7       FC?          FC,0.8       FC,0         FC,0

   q,20         t,705,20:hq  q,20         t,705,20:hq  h?10:q      h?20:q
   t,705,20:hq  t,1070,20:hq t,1070,20:hq t,1070,20:hq

end
```

Figur 3.1 Problembeskrivning för anpassning av huvudfläktar.

```
begin
format   o 1  p 0  q 1
control  duct=1
fan      FC  2000:15 1400:30  0:50                          rms= 0.000

   FC?          FC,0.7       FC?          FC,0.8       FC,0         FC,0
    0.694 -      0.805 -

   q,20         t,705,20:hq  q,20         t,705,20:hq  h?10:q      h?20:q
   t,705,20:hq  t,1070,20:hq t,1070,20:hq t,1070,20:hq
     -705 Pa      -716 Pa     -1070 Pa     -1056 Pa       86 Pa      343 Pa
     20.0 m3/s    20.2 m3/s    20.0 m3/s    19.9 m3/s    10.0 m3/s    20.0 m3/s

end 1  6 systems  14 elements  0 errors  1 observation  2007-05-09  08.19.53
```

Figur 3.2 Resultat för anpassning av huvudfläktar.

```
table   24 12 12  2                                                                                                .

parameter n1=0.7 n2=0.7  n3=0.8


pergram  a  -   1      0 0 n1 n1
pergram  b  -   1     n2 0 n2 n2
program  c  -   1     n3 n3 0 n3
program  A m2   1      0.1  1  10
program  q m3/s 0      0 20


result 1
result 3
result 4
result 5
result 6
result 8

result 2
result 7
result 9

result


table ...
```

```
begin
format   o 1  p 0 q 1
control  trix=2  duct=1
fan      FC  2000:15 1400:30  0:50
set      op=t,0.6    tag=t,1410,20:hqw   fag=t,1070,20:hqw

    "tillufsdel"                "brand"     h?                    "frånluftsdel"
                                            q,0,q

    tag          FC,n1,a:hw  FC,n2,b:hw          FC,n3,c:hw       fag
                                            744

                                "port"      op,A:tqvw


end
```

Figur 3.3 Problembeskrivning för byggtunnel med ventilationssystem 744.

```
table   24 12 12  2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                
parameter n1=0.7 n2=0.7  n3=0.8

step number                1      2      3      4      5      6      7      8      9     10     11     12
pro(1)  a    -           0.0    0.0    0.7    0.7    0.0    0.0    0.7    0.7    0.0    0.0    0.7    0.7
pro(2)  b    -           0.7    0.0    0.7    0.7    0.7    0.0    0.7    0.7    0.7    0.0    0.7    0.7
pro(3)  c    -           0.8    0.8    0.0    0.8    0.8    0.8    0.0    0.8    0.8    0.8    0.0    0.8
pro(4)  A    m2          0.1    0.1    0.1    0.1    1.0    1.0    1.0    1.0   10.0   10.0   10.0   10.0
pro(5)  q    m3/s          0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0

step number                1      2      3      4      5      6      7      8      9     10     11     12
res(1)       Pa        -1430  -1430  -1430  -1430  -1433  -1433  -1433  -1433  -1433  -1433  -1433  -1433
res(3)       Pa          717    717    717    717    716    716    716    716    716    716    716    716
res(4)       Pa          717    717    717    717    716    716    716    716    716    716    716    716
res(5)       Pa         1055   1055   1055   1055   1056   1056   1056   1056   1056   1056   1056   1056
res(6)       Pa        -1059  -1059  -1059  -1059  -1056  -1056  -1056  -1056  -1056  -1056  -1056  -1056
res(8)       Pa            4      4      4      4      0      0      0      0      0      0      0      0

res(2)       m3/s       20.1   20.1   20.1   20.1   20.2   20.2   20.2   20.2   20.2   20.2   20.2   20.2
res(7)       m3/s       19.9   19.9   19.9   19.9   19.9   19.9   19.9   19.9   19.9   19.9   19.9   19.9
res(9)       m3/s        0.2    0.2    0.2    0.2    0.3    0.3    0.3    0.3    0.3    0.3    0.3    0.3

res(10)      m/s         2.5    2.5    2.5    2.5    0.3    0.3    0.3    0.3    0.0    0.0    0.0    0.0


step number               13     14     15     16     17     18     19     20     21     22     23     24
pro(1)  a    -           0.0    0.0    0.7    0.7    0.0    0.0    0.7    0.7    0.0    0.0    0.7    0.7
pro(2)  b    -           0.7    0.0    0.7    0.7    0.7    0.0    0.7    0.7    0.7    0.0    0.7    0.7
pro(3)  c    -           0.8    0.8    0.0    0.8    0.8    0.8    0.0    0.8    0.8    0.8    0.0    0.8
pro(4)  A    m2          0.1    0.1    0.1    0.1    1.0    1.0    1.0    1.0   10.0   10.0   10.0   10.0
pro(5)  q    m3/s         20     20     20     20     20     20     20     20     20     20     20     20

step number               13     14     15     16     17     18     19     20     21     22     23     24
res(1)       Pa        -1430  -1430  -1430  -1430  -1433  -1433  -1433  -1433  -1433  -1433  -1433  -1433
res(3)       Pa          717    717    717    717    716    716    716    716    716    716    716    716
res(4)       Pa          717    717    717    717    716    716    716    716    716    716    716    716
res(5)       Pa         1055   1055   1055   1055   1056   1056   1056   1056   1056   1056   1056   1056
res(6)       Pa        -1059  -1059  -1059  -1059  -1056  -1056  -1056  -1056  -1056  -1056  -1056  -1056
res(8)       Pa            4      4      4      4      0      0      0      0      0      0      0      0

res(2)       m3/s       20.1   20.1   20.1   20.1   20.2   20.2   20.2   20.2   20.2   20.2   20.2   20.2
res(7)       m3/s       19.9   19.9   19.9   19.9   19.9   19.9   19.9   19.9   19.9   19.9   19.9   19.9
res(9)       m3/s        0.2    0.2    0.2    0.2    0.3    0.3    0.3    0.3    0.3    0.3    0.3    0.3

res(10)      m/s         2.5    2.5    2.5    2.5    0.3    0.3    0.3    0.3    0.0    0.0    0.0    0.0


begin
format   o 1  p 0 q 1
control  trix=1  duct=1
fan      FC  2000:15 1400:30  0:50                                rms= 0.000
set      op=t,0.6    tag=t,1410,20:hqw   fag=t,1070,20:hqw

    "tillufsdel"                "brand"      h?                    "frånluftsdel"
                                             -     0 Pa

    tag          FC,n1,a:hw  FC,n2,b:hw       FC,n3,c:hw       fag
                                        744
     -1433 Pa 1    716 Pa 3    716 Pa 4          1056 Pa 5       -1056 Pa 6
       20.2 m3/s 2                                                 19.9 m3/s 7
                                "port"       op,A:tqvw
                                                0 Pa 8
                                              0.3 m3/s 9
                                              0.0 m/s 10
end
```

Figur 3.4 Resultat för normaldrift och byggtunnel med ventilationssystem 744.

```
table   24 12 12  2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                
parameter n1=0.7 n2=0.7  n3=0.8

step number                1      2      3      4      5      6      7      8      9     10     11     12
pro(1)  a    -           0.0    0.0    0.7    0.7    0.0    0.0    0.7    0.7    0.0    0.0    0.7    0.7
pro(2)  b    -           0.7    0.0    0.7    0.7    0.7    0.0    0.7    0.7    0.7    0.0    0.7    0.7
pro(3)  c    -           0.8    0.8    0.0    0.8    0.8    0.8    0.0    0.8    0.8    0.8    0.0    0.8
pro(4)  A    m2          0.1    0.1    0.1    0.1    1.0    1.0    1.0    1.0   10.0   10.0   10.0   10.0
pro(5)  q    m3/s          0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0

step number                1      2      3      4      5      6      7      8      9     10     11     12
res(1)       Pa         -892   -442  -1000  -1430   -732    -81  -1356  -1433   -720     -1  -1431  -1433
res(3)       Pa         -217   -107    825    717   -178    -20    736    716   -175      0    717    716
res(4)       Pa          852   -107    825    717    893    -20    736    716    896      0    717    716
res(5)       Pa         1120   1220   -158   1055   1060   1086    -28   1056   1056   1057     -1   1056
res(6)       Pa         -864   -563   -492  -1059  -1043   -965    -88  -1056  -1056  -1054     -2  -1056
res(8)       Pa         -256   -657    649      4    -17   -121    116      0      0     -2      2      0

res(2)       m3/s       15.9   11.2   16.8   20.1   14.4    4.8   19.6   20.2   14.3    0.6   20.2   20.2
res(7)       m3/s       18.0   14.5   13.6   19.9   19.7   19.0    5.7   19.9   19.9   19.9    0.8   19.9
res(9)       m3/s       -2.1   -3.3    3.3    0.2   -5.3  -14.2   13.9    0.3   -5.6  -19.2   19.4    0.3

res(10)      m/s        20.7   33.1   32.9    2.5    5.3   14.2   13.9    0.3    0.6    1.9    1.9    0.0


step number               13     14     15     16     17     18     19     20     21     22     23     24
pro(1)  a    -           0.0    0.0    0.7    0.7    0.0    0.0    0.7    0.7    0.0    0.0    0.7    0.7
pro(2)  b    -           0.7    0.0    0.7    0.7    0.7    0.0    0.7    0.7    0.7    0.0    0.7    0.7
pro(3)  c    -           0.8    0.8    0.0    0.8    0.8    0.8    0.0    0.8    0.8    0.8    0.0    0.8
pro(4)  A    m2          0.1    0.1    0.1    0.1    1.0    1.0    1.0    1.0   10.0   10.0   10.0   10.0
pro(5)  q    m3/s         20     20     20     20     20     20     20     20     20     20     20     20

step number               13     14     15     16     17     18     19     20     21     22     23     24
res(1)       Pa         -228      0   -232   -547   -652      0  -1143  -1303   -720      0  -1427  -1431
res(3)       Pa          -55      0   1020    940   -159      0    789    749   -175      0    718    717
res(4)       Pa         1021      0   1020    940    913      0    789    749    896      0    718    717
res(5)       Pa          873   1056   -439    726   1031   1056   -105   1008   1056   1056     -2   1055
res(6)       Pa        -1611  -1056  -1370  -2058  -1133  -1056   -329  -1203  -1057  -1056     -7  -1058
res(8)       Pa          738      0   1808   1333    102      0    435    195      1      0      9      2

res(2)       m3/s        8.0   -0.1    8.1   12.5   13.6    0.0   18.0   19.2   14.3    0.0   20.1   20.1
res(7)       m3/s       24.5   19.9   22.6   27.7   20.6   19.9   11.1   21.2   19.9   19.9    1.6   19.9
res(9)       m3/s        3.5    0.0    5.5    4.7   13.0    0.1   26.9   18.0   14.4    0.1   38.5   20.3

res(10)      m/s        35.1    0.3   54.9   47.1   13.0    0.1   26.9   18.0    1.4    0.0    3.9    2.0


begin
format   o 1  p 0 q 1
control  trix=2  duct=1
fan      FC  2000:15 1400:30  0:50                          rms= 0.000
set      op=t,0.6    tag=t,1410,20:hqw   fag=t,1070,20:hqw

    "tillufsdel"                "brand"      h?                      "frånluftsdel"
                                             -     0 Pa

    tag          FC,n1,a:hw  FC,n2,b:hw       FC,n3,c:hw       fag
                                        744
     -1433 Pa 1    716 Pa 3    716 Pa 4          1056 Pa 5       -1056 Pa 6
       20.2 m3/s 2                                                 19.9 m3/s 7
                                "port"       op,A:tqvw
                                                0 Pa 8
                                              0.3 m3/s 9
                                              0.0 m/s 10
end
```

Figur 3.5 Resultat för störfall och byggtunnel med ventilationssystem 744.

Tillämpning på system 744 utbyggnadsdelen

Tryckstegringen har beräknats till 1410 Pa för tilluftsdelen och 1070 för frånluftsdelen vid ett flöde om 20 m^3/s. Antag att dessa tryckstegringar också är de samma vid nollflöde. Flödet och tryckändring kan beräknas till följande vid bortfall av delsystem a respektive delsystem b enligt avsnitt 2 formler (2.1-4) med korrektion av flödesformel (2.1) och (2.3) till absolut flöde och inte relativt flöde. Parametrarna *a=1470* och *b=1070* ger resultatet:

$$q_a = 20\ (1070/(1410+1070))^{0.5} = 13.1\ m^3/s$$

$$p_{ab} = -\ ab/(a+b) = -\ 1410\ 1070/(1410+1070) = -\ 608.3\ Pa$$

$$q_b = 20\ (1410/(1410+1070))^{0.5} = 15.1\ m^3/s$$

$$p_{ab} = ab/(a+b) = 1410\ 1070/(1410+1070) = 608.3\ Pa$$

Dessa värden stämmer väl med de i PFS beräknade. Tryckändringarna är -657 Pa och 649 Pa och motsvarande medelflöden för tilluft och frånluft är 12.8 m^3/s respektive 15.2 m^3/s. Skillnaden kan förklaras med att PFS-modellen har en läcka och icke konstanta fläkttryck-stegringar.

Antag att fläktarnas tryckstegring vid nollflöde är 1700 Pa respektive 1300 Pa för att förenklat beskriva att fläktarnas tryckstegring ökar med minskande flöde. Den ökade tryckstegringen med 290 Pa och 230 Pa kan för ett kvadratiskt fall tolkas som om tangenten i driftspunkten når nollflöde 580 Pa respektive 460 Pa över driftstryckstegringen. Tryckstegringen är egentligen mycket högre för axialfläktar, men detta är långt från det normala arbetsområdet.

Detta ger följande flöden och tryckändringar:

$$q_a = 20\ (1300/(1700+1300))^{0.5} = 13.2\ m^3/s$$

$$p_{ab} = -\ ab/(a+b) = -\ 1700\ 1300/(1700+1300) = -\ 736.7\ Pa$$

$$q_b = 20\ (1700/(1700+1300))^{0.5} = 15.1\ m^3/s$$

$$p_{ab} = ab/(a+b) = 1700\ 1300/(1700+1300) = 736.7\ Pa$$

Flödena är desamma, men tryckändringen är givetvis högre.

Resultat för system 744 utbyggnadsdelen

Bortfall av tilluftdel eller frånluftdel ger som väntat i stort sett samma tryckändring med undertryck 657 Pa respektive övertryck 649 Pa. Detta framgår av Figur 3.5 för fall 2 och 3 och resultatutskrift 8.

Resultatet för fall 15 med bortfall av frånluft och ett brandflöde på 20 m^3/s blir en tryckskillnad på 1808 Pa.

Inverkan av de tre olika läckareorna är uppenbar, eftersom de fungerar som tryckavlastning. En ökning av arean med en faktor 10 innebär dock inte att tryckskillnaden ändras en faktor 100, eftersom hastigheten i öppningen och flödet ändras. Fall 2, 6 och 10 med öppningsytorna 0.1, 1 och 10 m^2 har tryckskillnaderna -486, -118 respektive -2 Pa och tillhörande hastigheter och flöden är 28.5, 14.0 respektive 1.9 m/s respektive 2.8, 14.0 respektive 19.4 m^3/s.

Åtgärdsförslag för system 744 utbyggnadsdelen

En tryckskillnad på 1000 Pa kan många lättkonstruktionsväggar klara av, men spännvidden har stor betydelse. En tryckskillnad på 1000 Pa över en öppning skapar en genomströmnings-hastighet på över 40 m/s. Tryckskillnaden är proportionell mot hastigheten i kvadrat. Det kan finnas risk för personskador eller materiella skador om öppningen är en dörr eller en port.

Slutsatsen av ovanstående siffror är att om höga tryckskillnader vid plötsliga driftstörningar skall kunna undvikas krävs någon form av tryckavlastning eller ett kontrollerat läckage med en minsta garanterad öppning mot det fria. En lösning kan vara att fläkten Q3 för system 744 och Q9 för system 743 regleras för att hålla ett mindre undertryck innanför in- och utfartsportarna, när dessa är stängda. Övertryck är inte tillåtet på grund av risk för föroreningsspridning. Denna reglerfunktion kopplas bort när portar eller dörrar öppnas.

Det skall dock påpekas att redan en liten tryckskillnad över en öppning ger upphov till en hög hastighet och därmed ett stort flöde. En hastighet på 1, 2, 5 och 10 m/s fås för tryckskillnader 0.6, 2.4, 15 respektive 60 Pa. Detta innebär för en effektiv area om 1 m^2 flöden på 1, 2, 5 respektive 10 m^3/s, vilket skall jämföras med ventilationsflödet. Det är därför uppenbart att den reglerade tryckskillnaden skall vara minsta möjliga. Det finns också risk för dubbelströmning i en öppning vid stora temperaturskillnader och små tryckskillnader över öppningen. Endast inströmning genom en 1 m hög öppning kräver en tryckskillnad på minst 0.6 Pa vid en temperaturskillnad på 14 ºC. En annan lösning kan vara en självöppnade lucka av tillräcklig storlek.

De här genomförda beräkningarna bygger på att aggregattryckfallet är 1410 Pa vid 20 m^3/s för tilluftsdelen med vävtub medräknad och 1070 Pa för frånluftsdelen vid 20 m^3/s. Strömnings-tryckfallet i tunneln har försummats. Fläktkurvor har anpassats för att flödet skall bli 20 m^3/s.

Något som kan mildra tryckändringar vid bortfall av fläktars drift är att den roterande massan hos fläkthjul och motor (direktdrift) medför att det tar en viss tid innan fläkten endast roterar utan att driva på. Tröghetsmomentet är angivet till 8.1 kgm^2 och varvtalet är 1470 rpm. Rörelseenergin kan beräknas något avrundat till 100000 J ($8.1((1470/60)\ 2\pi)^2/2$). En möjlig driveffekt för tryckstegringen 1000 Pa, flödet 20 m^3/s och verkningsgraden 0.8 är 25000 W (1000 20 / 0.8). Siffrorna visar att den lagrade rörelseenergin räcker till för full drift under 4 s. Detta innebär att bortfall av en fläkts drivning inte slår igenom direkt med ett enda tryckslag utan det sker en dämpad och utjämnad övergång.

Den här beskrivna utjämningseffekten försvinner givetvis mer eller mindre helt om en fläkts lager skär ihop mer eller mindre tvärt.

4 Analys av system 743 driftdelen

En principskiss för driftsystemet 743 avsedd för beräkning med PFS redovisas i Figur 4.1, där alla fläktar anges med ordinarie beteckningar med första bokstav Q. Luftflöden är angivna och kan avläsas efter ett inledande t?.

Drifttunnelsystemets huvudfläktar tryckhåller en fördelningslåda 3VB för tilluft och en samlingslåda 2VB för frånluft. En huvudfläkt för frånluft använder tunneln som frånluftkanal. Det finns ett antal lokala ventilationssystem med egna fläktar för tilluft och frånluft för olika verksamheter som anslutna mellan fördelningslådan 3VB och samlingslådan 2VB.

Ett problem med att analysera system 743 för driftdelen är att det är mera komplext och att det inte finns några lättillgängliga data om tryckfall för olika delar vid givna flöden. Modellen i Figur 4.1 måste injusteras med angivande av de sex tryckhållningspunkter numrerade 1-6 för de två ventilationskamrarna, en för tilluft och en för frånluft, och fyra bergrumsavdelningar. Alla delsträckors tryckfall och flöden skall också anges helst för det driftsfall som skall störas. Alla fläktar kan därefter anpassas för den givna tryckstegringen och det givna flödet.

En bedömning är att fläktbortfall hos system 743 leder till mindre tryckändringar jämfört med system 744, eftersom det finns ett antal fläktar hos system 743 som flyttar luft mellan ventilationsbyggnad/kammare 3 och 2 för tilluft respektive frånluft.

Mätdata för driftfall A1 för system 743 driftdelen har översänts i form av fem A4-sidor med figurer, vilka sammanställs i Tabell 4.1 på nästa sida med följande kommentarer.

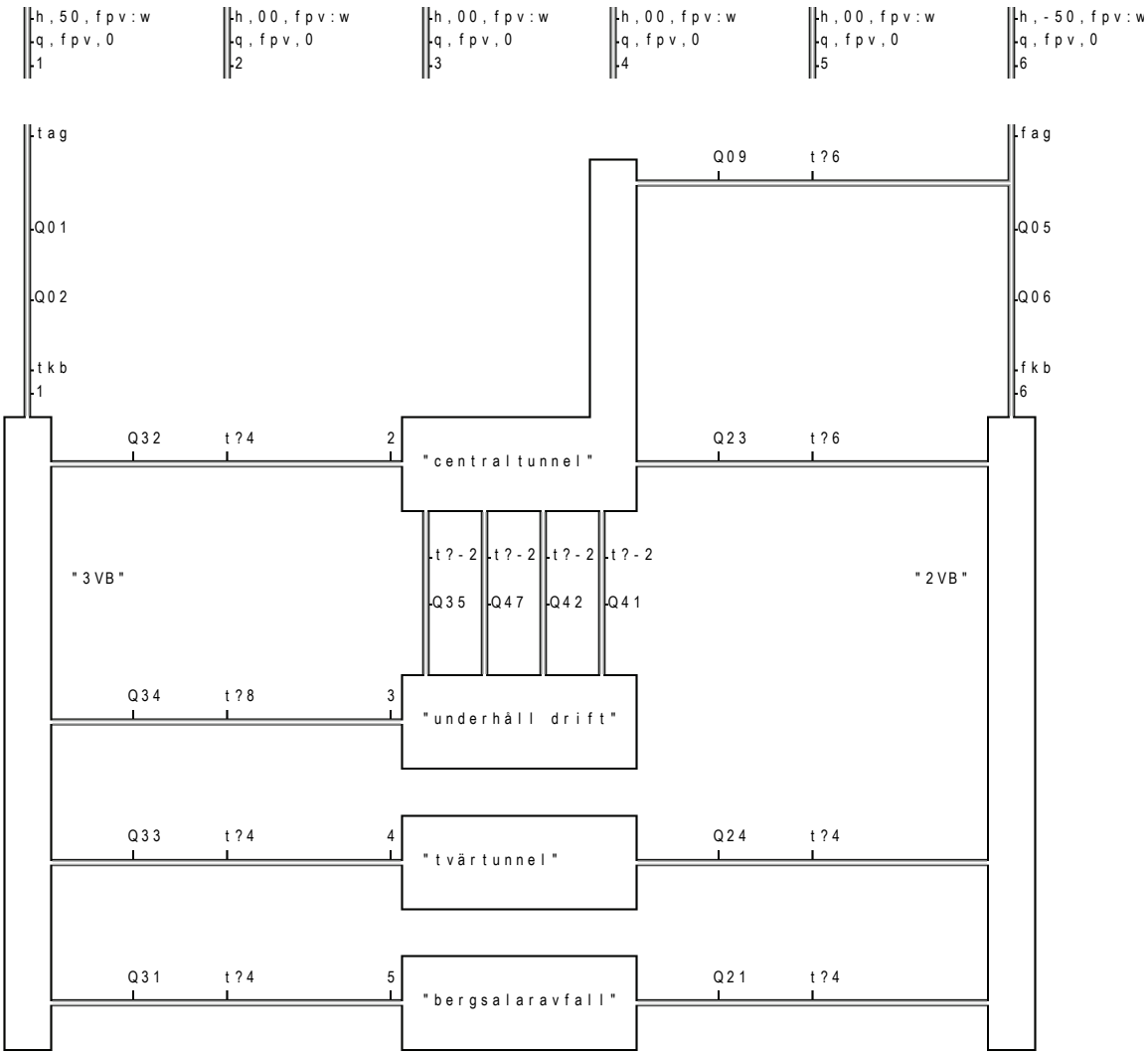
Totalt tilluftsflöde eller ventilationsflöde ges av Q3, Q4 till 16.9 m^3/s, men kan även summeras för Q31+Q32+Q33+Q34 till 15.8 m^3/s eller som Q9+Q22+Q23+Q24 till 21.1 m^3/s. Summeringen Q5+Q6+Q9 ger också det totala ventilationsflödet som 22.7 m^3/s. Det finns alltså vissa skillnader, vilka kan förklaras med olika läckage, konstanta eller tillfälliga. Det är inte möjligt att mäta alla tryck och flöden samtidigt i anläggningen. Portöppningar eller dito stängningar och tryckreglering kan påverka resultatet.

En märklig uppgift är intrycket på -420 Pa för Q9 som är placerad vid porten till drifttunneln. En tryckskillnad på 420 Pa över en öppning av något slag ger upphov till en lufthastighet på över 25 m/s.

En annan märklig uppgift är att trycket före den långa tilluftskanalen som går till fördelnings-lådan 3VB är endast 50 Pa . Fördelningslådan 3VB skall hålla ett övertryck på 50 Pa.

Det saknas uppgifter på fläktarna Q35, Q41, Q42 och Q47 som överför ventilationsluft från bergrum för underhåll och drift till centraltunnel.

```
begin
format  p 0  q 1
control duct=1    trix=3
parameter  can=1
fan     FSMB  1000:3    800:6   0:9
fan     FSMC  2000:15  1400:30  0:50
set     Q01=FSMC,1,fix:hqw    Q02=FSMC,1,can:hqw     Q05=FSMC,1,can:hqw<    Q06=FSMC,1,can:hqw<
set     Q21=FSMB,1,can:hqw    Q23=FSMB,1,can:hqw     Q24=FSMB,1,can:hqw     Q09=FSMC,2,2:hqw
set     Q31=FSMB,1,can:hqw    Q32=FSMB,1,can:hqw     Q33=FSMB,1,can:hqw     Q34=FSMB,1,can:hqw
set     Q41=FSMB,1,can:hqw<   Q42=FSMB,1,can:hqw<    Q47=FSMB,1,can:hqw<    Q35=FSMB,1,can:hqw<
set     tkb=d,2000,1500,1000  tag=t?20
set     fkb=d,2000,1500,1000  fag=t?-20
```




```
end
```

Figur 4.1 Förslag till beskrivning av drifttunnel med ventilationssystem 743 med PFS.

Tabell 4.1 Mätdata för fläktar i system 743 driftdelen och driftfall A1

fläktbeteckning	intryck Pa	uttryck Pa	tryckstegring Pa	flöde m^3/s
Q3,Q4	-200	50	250	16.9
Q5,Q6	-300	150	450	12.6
Q9	-420	125	545	10.1
Q22	-260	25	285	5.0
Q23	-1500	40	1540	4.0
Q24	-1165	40	1205	2.0
Q31	-14	-40	-26	3.0
Q32	-10	50	60	6.0
Q33	-4	-85	-89	2.0
Q34	-390	120	510	4.8
Q35	?	?	?	3.2?
Q41	?	?	?	0.9?
Q42	?	?	?	0.3?
Q47	?	?	?	0.5?

Resultat för system 743 driftdelen

Det saknas tillräckligt bra uppgifter för att beräkna olika driftstörningars betydelse för trycket i system 743 driftdelen. System 743 driftdelen har stora likheter med system 744 byggdelen när det gäller de stora fläktarnas storlek, tryckstegring och flöde. Detta innebär att beräknade störningar för system 744 byggdelen kan antas gälla även för system 743 driftdelen.

Det förhåller sig också så att det i princip finns en omgång extra tilluftsfläktar Q31, Q32, Q33 och Q34 som kan föra ventilationsluften vidare från fördelningslådan 3VB som matas av seriekopplingen av Q1 och Q2.

Detta gäller även för en del av frånluften som förs vidare till samlingslådan 2VB av fläktarna Q21, Q23 och Q24. Samlingslådan 2VB evakueras av seriekopplingen av Q5 och Q6.

Frånluften är i slutänden uppdelad på fläktarna Q9 och seriekopplingen av Q5 och Q6.

Den sammanfattande slutsatsen är att samma störningar vid samma totala ventilationsflöde i system 744 utbyggnadsdelen kommer at bli mindre i system 743 driftdelen, eftersom det finns nästan fyra omgångar eller lager av fläktar som för in och ut ventilationsluft ur bergrums-anläggningen.

5 Analys av brandflöde för en tunnelbrand

Brandflödet är brandens termiska expansion av lokalluften. Det finns en tumregel som anger att brandflödet i m^3/s är lika med brandeffekten i MW. Detta gäller för mindre lokaler. En tunnel är något helt annat, vilket simuleringarna i detta avsnitt kommer att visa. En bussbrand, en lastbilsbrand och fyra typbränder skall undersökas för att bestämma hur brandflödet påverkas av tunneln. Brandeffekten beskrivs i samtliga fall med en kvadrerad sinusfunktion på formen:

$$P(t) = P_{max} \sin(\pi t/2t_{max})^2 \qquad \text{(W)}$$

P_{max} maxbrandeffekt, W
t_{max} maxeffekttidpunkt, s

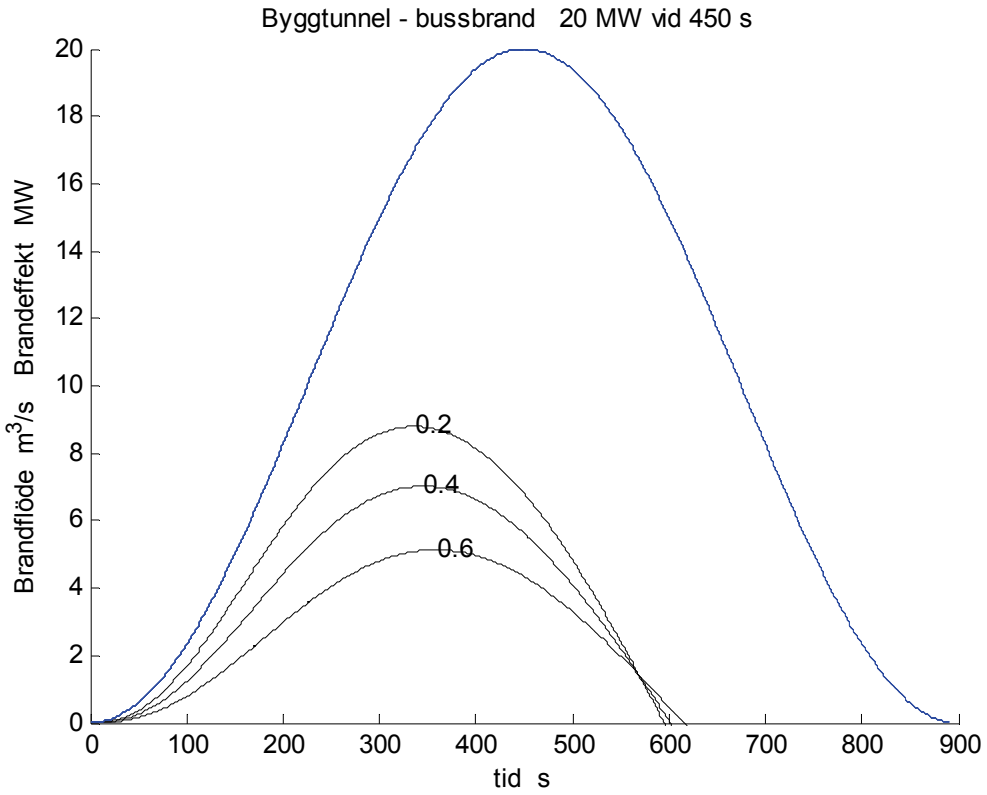
Maxeffekt och maxtidpunkt är 20 MW och 450 s för bussbranden och 100 MW och 2400 s för lastbilsbranden. De förväntade brandflöden är enligt tumregel 20 respektive 100 m^3/s.

En enkel tvåzonsmodell har använts för att beräkna brandflödet. Tunneln har beskrivits med golvytan 12000 m^2 och rumshöjden 6 m. Väggytan är fem gånger större än för ett kvadratiskt rum. Brandens strålningsandel varieras med de tre värdena 0.2, 0.4 och 0.6. Resultatet redovisas i Figur 5.1 och 5.2 med brandflödet och brandeffekt i samma diagram. Tidpunkt, brandgaslagernivå, brandeffekt, brandflöde och tumregelkvot redovisas i Tabell 5.1 för de två fordonsbränderna och olika strålningsandel.

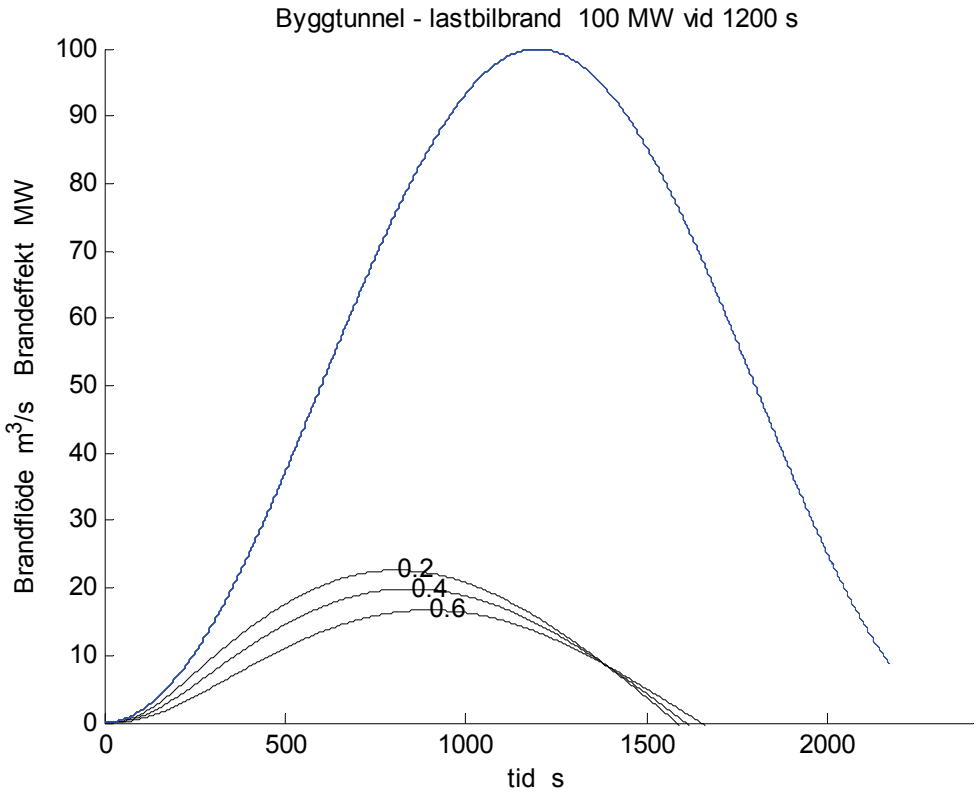
Det maximala brandflödet inträffar något tidigare än brandfallens maxeffekt och för strålningsandel 0.4 är de två brandflöden 7 och 20 m^3/s. Tumregelkvoten är 0.40 och 0.25 och klart lägre än ett. Lastbilsbranden är den dimensionerande branden. Det skall dock påpekas att det tar tid innan brandflödet når sitt maxvärde. En viktig observation är att brandgaslagret upptar endast en mindre del av rumshöjden och att brandflödet blir negativt efter 600 och 1500 s för bussbranden respektive lastbilsbranden.

Tabell 5.1 Beräknad tid, brandgaslagernivå, brandeffekt, brandflöde och tumregelkvot

strålningsdel	t_b s	h_b m	P_b MW	q_b m^3/s	m^3/sMW
0.2	336.0	5.50	17.00	8.79	0.52
0.4	345.0	5.53	17.43	7.02	0.40
0.6	359.0	5.58	18.05	5.14	0.28
0.2	811.0	4.25	76.24	22.62	0.30
0.4	847.0	4.34	80.13	19.88	0.25
0.6	899.0	4.45	85.26	16.72	0.20



Figur 5.1 Bussbranden



Figur 5.2 Lastbilsbranden

Den fem gånger större lastbilsbranden har ett brandflöde som är grovt tre gånger större än den mindre bussbranden. Detta visar att brandens tillväxt hastighet har stor betydelse. Detta skall undersökas med en brand med en maximal effekt om 10 MW och med fyra olika bränntider om 1, 10, 100 och 1000 s. Resultatet för brandflödet och brandeffekten redovisas i Figur 5.3-6 och i Tabell 5.2 nedan.

Samtliga brandfall i Tabell 5.2 visar att en kortvarig brand skapar ett större brandflöde än en långvarig brand med samma största brandeffekt. Resultaten visar också att brandens strålningsandel begränsar brandflödet. Strålningsandelarna 0.2 och 0.6 motsvarar en halvering av den konvektiva brandeffekten från 0.8 till 0.4, vilket framgår av de redovisade brandflödena.

De här redovisade tumregelvärden begränsas teoretiskt till 2.28, 1.71 och 1.14 för strålningsandelarna 0.2, 0.4 respektive 0.6 eller egentligen bättre de konvektiva andelarna 0.8, 0.6 respektive 0.4.

En observation är att det största brandflöde inträffar på relativt samma tidpunkt för de tre kortvarigare bränderna och något tidigare för den långvariga branden. En tangent på brandeffektkurvan till origo sammanfaller rätt väl med tidpunkten för största brandflöde.

Detta avsnitts slutsatser kan formuleras som följer:

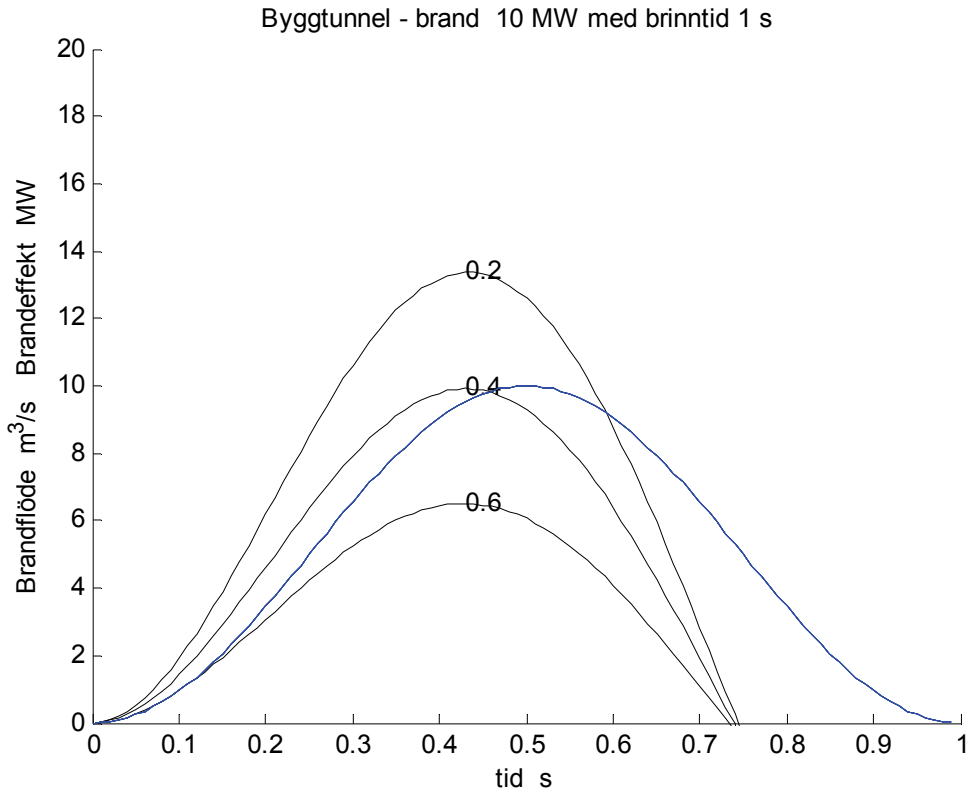
Lastbilsbranden är dimensionerande.

Brandflödet överskattas med tumregeln.

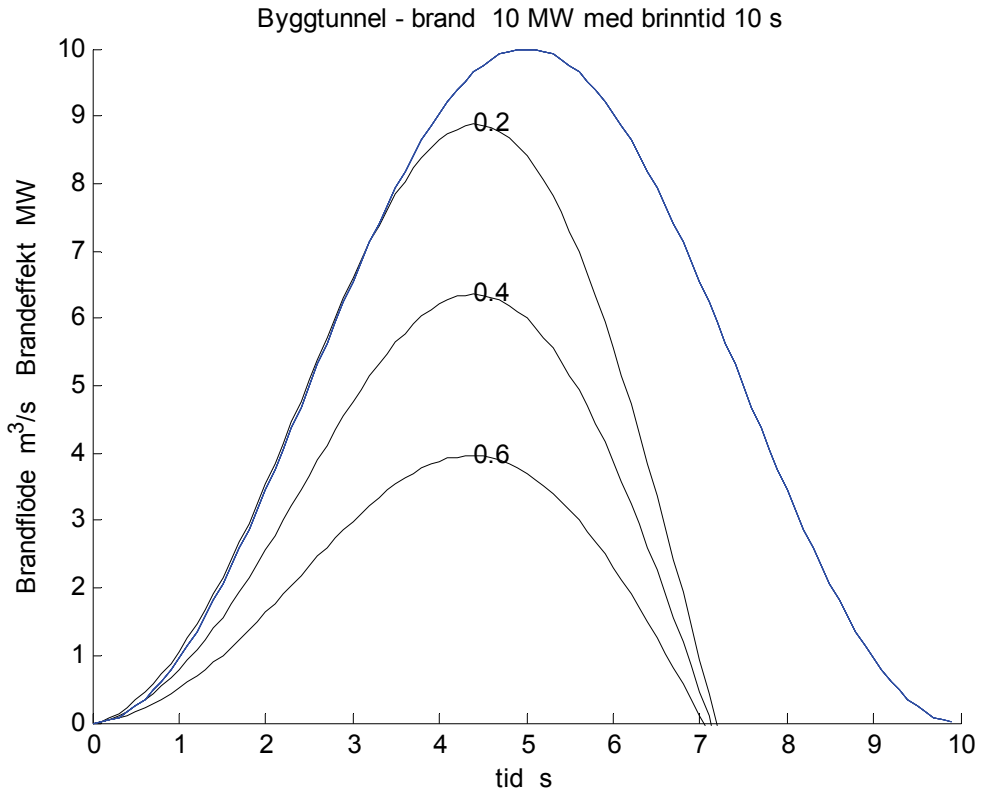
Brandens tillväxthastighet har betydelse för brandflödet.

Tabell 5.2 Beräknad tid, brandgaslagerhöjd, brandeffekt, brandflöde och tumregelkvot

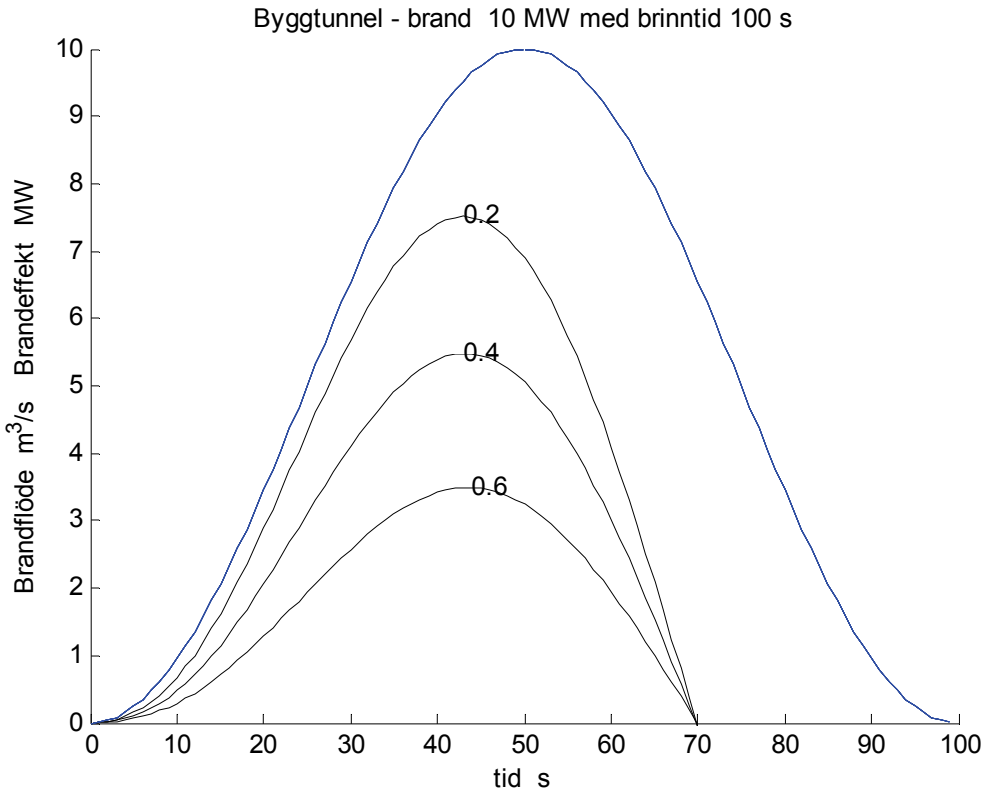
strålningsdel	brinntid s	t_b s	h_b m	P_b MW	q_b m^3/s	m^3/sMW
0.2	1	0.43	6.00	9.52	13.36	1.40
0.4	1	0.43	6.00	9.52	9.91	1.04
0.6	1	0.43	6.00	9.52	6.50	0.68
0.2	10	4.40	5.99	9.65	8.87	0.92
0.4	10	4.40	5.99	9.65	6.36	0.66
0.6	10	4.40	5.99	9.65	3.96	0.41
0.2	100	43.00	5.94	9.52	7.51	0.79
0.4	100	43.00	5.95	9.52	5.47	0.57
0.6	100	44.00	5.95	9.65	3.49	0.36
0.2	1000	380.00	5.56	8.64	4.37	0.51
0.4	1000	390.00	5.59	8.85	3.42	0.39
0.6	1000	400.00	5.63	9.05	2.45	0.27



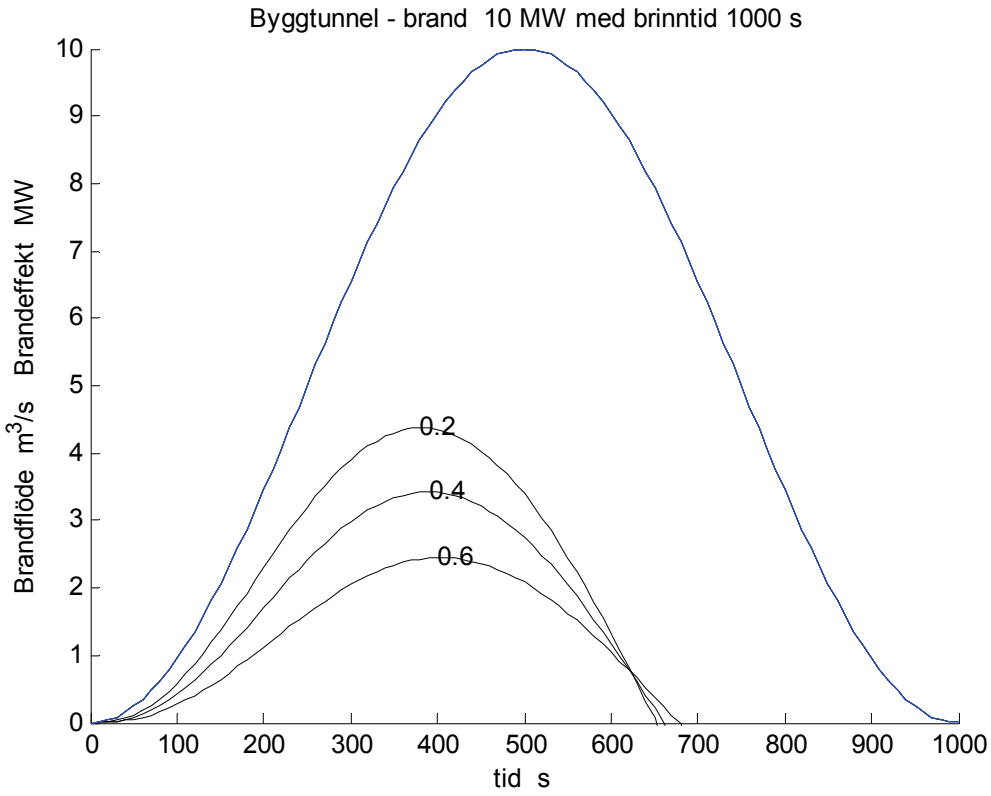
Figur 5.3 Brand med brinntid 1 s



Figur 5.4 Brand med brinntid 10 s



Figur 5.5 Brand med brinntid 100 s



Figur 5.6 Brand med brinntid 1000 s