



LUND UNIVERSITY

Strömningsanalys av tågtunnelstation

Jensen, Lars

2010

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Jensen, L. (2010). *Strömningsanalys av tågtunnelstation*. (TVIT; Vol. TVIT-7057). 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

Strömningsanalys av tågtunnelstation

Lars Jensen

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet, 2010
Rapport TVIT--10/7057



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 rökspredning vid brand, installationernas belastning på yttre miljön, att betrakta byggnad och installationer som ett byggnadstekniskt system, analysera och beräkna inneklimatet i olika typer av byggnader, effekter av brukarnas beteende för energianvändning, reglering av golvvärmesystem, bestämning av luftflöden i byggnader med hjälp av spårgasmetod. Vi utvecklar även användbara projekteringsverktyg för energi och inomhusklimat, system för individuell energimätning i flerbostadshus samt olika analysverktyg för optimering av ventilationsanläggningar hos industrin.

Strömningsanalys av tågtunnelstation

Lars Jensen

© Lars Jensen, 2010
ISRN LUTVDG/TVIT--10/7057--SE(72)

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 LUND

Innehållsförteckning

1	Inledning och syfte	5
	Uppdrag	5
	Andra uppslag	5
	Enkel tryckutjämningssteori	6
	Strömning av brandgaser	6
	Avgränsningar	6
2	Test av åtgärder	7
	Mätpunkter	7
	Beräkningsmodell PFS	8
	Utgångsfall	9
	Strypning av tunneltvärsnitt	10
	Fördubblad öppning mot perrong	11
	Öppet brandventilationssystem	12
	Alla tre åtgärder	13
	Sammanfattning av resultat	14
3	Andra åtgärder och tester	15
	Rulltrappssystem med strypt övre öppning	16
	Rulltrappssystem med en extra strypning	17
	Rulltrappssystem med två extra strypningar	18
	Tre öppna perrongdörrar	19
	Två öppna perrongdörrar	20
	En öppen perrongdörr	21
	Alla perrongdörrar stängda	22
4	Brandgasventilation i drift	23
	Normal tågdrift	23
	Öppna och stängda perrongdörrar och tryckutjämningschakt	24
5	Annan utformning	25
	Ett tryckutjämningschakt med diameter 6400 mm	28
	Ett tryckutjämningschakt med diameter 8000 mm	29
	Ett tryckutjämningschakt med diameter 9600 mm	30
	Två tryckutjämningschakt med diameter 4800 mm	31
	Två tryckutjämningschakt med diameter 6400 mm	32

6	Aktiv tryckutjämning	33
	Tryckutjämning till 30 Pa övertryck	34
	Tryckutjämning till nolltryck	35
	Tryckutjämning till 30 Pa undertryck	36
	Tryckutjämningsfunktion 0-60 Pa vid 0-1000 m ³ /s	37
	Tryckutjämningsfunktion 30-90 Pa vid 0-1000 m ³ /s	38
	Tryckutjämningsfunktion 60-120 Pa vid 0-1000 m ³ /s	39
	Tryckutjämning med halva tågflödet	40
	Tryckutjämning med hela tågflödet	41
	Sammanfattning av resultat	42
7	Förenklad teori för tryckutjämning	43
8	Ombländning vid tryckutjämningschakt	45
9	Motströmning vid brandgaskontroll	57
10	Igensättning av tryckutjämningschakt	65
	Appendix A Tryckutjämningschakt	71
	Appendix B Brand i tågtunnel	72

1 Inledning och syfte

Bakgrunden till denna arbetsrapport var ett mindre uppdrag för att utvärdera tre åtgärder för att minska lufthastigheten i stationsperrongdörrar till station Triangeln orsakad av olika tågrörelser. Provkörning med tåg visade att lufthastigheten kunde bli omkring 15 m/s.

Uppdrag

De tre åtgärder undersöktes var för sig och gemensamt för nio olika tågrörelser enligt Tabell 1.1. Uppdraget dokumenteras i denna arbetsrapport som avsnitt 2. Alla tågrörelser är lika och skapar ett flöde på 400 m³/s, vilket kan motsvara ett tåg med tvärsnittet 10 m² och hastigheten 40 m/s eller 144 km/h. De nio tågrörelsefall sker alla med gång söderut. Det finns ett antal symmetriska fall med gång norrut som ger samma resultat. Det finns en mindre strömningsteknisk skillnad mellan tåg till station Triangeln och tåg från station Triangeln. Fall med tre eller fler tåg mot eller från station Triangeln förekommer inte.

Tabell 1.1 Nio tågrörelsefall

spår\fall	1	2	3	4	5	6	7	8	9
71 norr		tåg		tåg	tåg		tåg	tåg	tåg
74 norr				tåg			tåg		tåg
71 söder						tåg		tåg	tåg
74 söder			tåg		tåg	tåg	tåg	tåg	tåg
antal tåg	0	1	1	2	2	2	3	3	4

Andra uppslag

Arbetet med uppdraget gav uppslag på andra åtgärder med strypning av rulltrappssystem och andra driftsfall med olika antal öppna perrongdörrar, vilket redovisas i avsnitt 3.

Ett udda men viktigt driftsfall är driftsatt brandgasventilation. Vad detta innebär tillsammans med de nio tågrörelserna samt med öppna och stängda perrongdörrar och tryckutjämningschakt med driftsatt brandgasventilation redovisas i avsnitt 4.

Tryckutjämning sker med fyra tryckutjämningschakt, två rulltrappssystem och ett brandgasventilationssystem med ett mindre läckage med stängda spjäll. Ett enda tryckutjämningschakt för station Triangeln är en annan utformning, men en ännu bättre utformning är två tryckutjämningschakt i var ände av station Triangeln, vilka samtidigt ersätter brandgasventilationssystemet. Detta redovisas i avsnitt 5. Olika grad av igenfrostning av de fyra tryckutjämningschakten sammanställs med två olika perrongdörrsöppningar i avsnitt 10.

Brandgaser från en tunnelbrand kan på detta sätt tas om hand direkt. Två stora axialfläktar är placerade i var sitt tryckutjämningschakt svarar för brandgasventilationen och vid normal drift kan fläktbladen tvärställas eller fläkthjulen frirotera.

Ett alternativ till passiv tryckutjämnning kan vara aktiv tryckutjämnning, vilket undersöks i avsnitt 6. Samma fläktar som för brandgasventilation används. Detta görs enbart i ett undersökande syfte för att bestämma hur stora luftflöden som måste kunna tillföras eller borföras från station Triangeln. Det aktiva tryckutjämningsflödet blir av samma storleksordning som summaflödet för tågrörelserna.

Enkel tryckutjämnningsteori

En enkel teori där att alla strömningsvägar mellan station Triangeln och omgivningen ersätts med en ekvivalent effektiv genomströmningsarea beskrivs i avsnitt 7. Modellen bygger på att summaflödet av tågrörelserna är lika med produkten mellan den totala effektiva arean och den sökta gemensamma lufthastigheten genom alla ekvivalenta öppningsareor.

Strömning av brandgaser

Inströmning av uteluft via ett tryckutjämningschakt blandas med i en tågtunnel strömmande brandgaser, när brandgasventilationen är i drift. Detta för ner brandgaser på en lägre nivå och försämrar sikten. Detta undersöks i avsnitt 8.

Brandgaskontroll med övertryck kan till en del förhindra eller försvåra brandgasströmning mot det högre trycket. Brandgasventilation har samma problem med motströmning på andra sidan av branden i förhållande till utsugningspunkten för brandgasventilationen. Detta undersöks i avsnitt 9.

Avgränsningar

Beräkningar är förenklade till statiska fall. En tågrörelse skapar ett konstant flöde som påverkar tågtunnelsystemet. Tågrörelser skapar tryckslag med stora ändringar i tryck och lufthastighet, men detta beaktas inte här. Tryckslag fortplantas med ljudhastigheten genom hela tågtunnelsystemet. Tryckslag dämpas och reflekteras och gångtiden genom hela tunnelsystemet är mindre än 20 s, medan gångtiden för ett passerande tåg med hastigheten 30 m/s (108 km/h) genom hela tunnelsystemet är minst 200 s.

Ett tryckslag $\Delta p = \rho c \Delta v$ uppstår i en tunnel när lufthastigheten ändras tvärt med Δv , ρ densitet, kg/m³ och c ljudhastigheten, m/s. En hastighetsändring om 1 m/s ger ett tryckslag om 400 Pa. Ett tåg med hastigheten 30 m/s (108 km/h) och ett tvärsnitt som är en femtedel av tunneltvärsnittet skapar en hastighetsändring om 6 m/s och därmed ett tryckslag omkring 2400 Pa., som dämpas ut till en del. Återströmning kring tåg försummas.

Det mänskliga örat klarar högst tryckändringar omkring 1500 Pa under 4 s.

2 Test av tre åtgärder

De tre åtgärder som skulle utredas var strypning av tunneltvärsnitt med en femtedel, fördubblad öppningsarea mellan rulltrappssystem och perrong och brandgasventilationssystem med öppna spjäll och strömlösa brandgasfläktar. Varje åtgärd behandlas och genomräknas med PFS för de nio tidigare beskrivna tågrörelserna och beskrivs på en sida. Alla tre åtgärderna kombineras i ett fjärde åtgärdsfall och redovisas på samma sätt som de enskilda åtgärderna. Resultatet sammanfattas sist i detta avsnitt för de fyra mest intressanta tågrörelserna.

Mätpunkter

Spår 71 ligger här väster om spår 74. Alla flöden anges som in- eller utflöde till station Triangeln. Ett positivt värde för ett inflöde är ett inflöde och ett negativt inflöde är ett utflöde. Ett positivt värde för ett utflöde är ett utflöde och ett negativt utflöde är ett inflöde. Ordningsföljden för tolv mätdata för de fem beräkningarna är den som redovisas i Tabell 2.1.

Tabell 2.1 Tolv mätpunkter

mätpunkt	variabel	sort	res()
perrongöppning	hastighet	m/s	5
perrong	övertryck	Pa	6
tunnel spår 71 norr	inflöde	m ³ /s	1
tunnel spår 74 norr	inflöde	m ³ /s	2
tryckutjämning spår 71 norr	inflöde	m ³ /s	3
tryckutjämning spår 74 norr	utflöde	m ³ /s	4
brandgasventilation	utflöde	m ³ /s	7
rulltrappssystem söder = norr	utflöde	m ³ /s	8
tryckutjämning spår 71 söder	inflöde	m ³ /s	9
tryckutjämning spår 74 söder	utflöde	m ³ /s	10
tunnel spår 71 söder	utflöde	m ³ /s	11
tunnel spår 74 söder	utflöde	m ³ /s	12

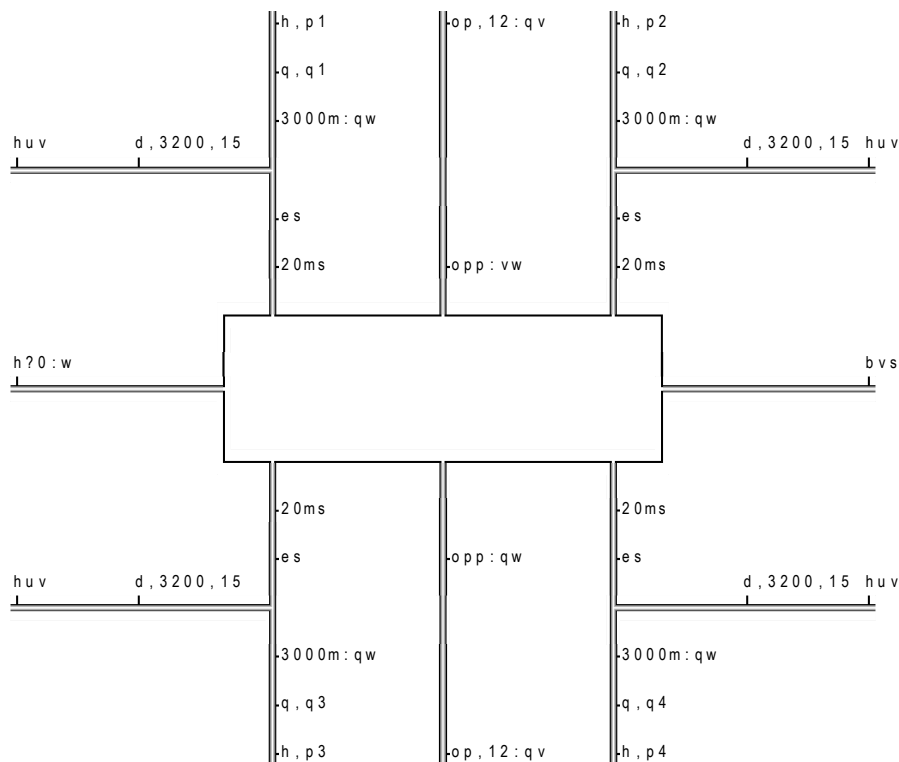
Beräkningsmodell PFS

En beräkningsmodell för hela tågtunnelstationssystemet beskrivs med följande komponenter:

- fyra tågtunnlar längd 3000 m, diameter 7000 mm och ytråhet 100 mm
- fyra tågtunnlar längd 20 m, diameter 7000 mm och ytråhet 100 mm
- fyra tryckutjämningschakt längd 15 m, diameter 3200 mm och två engångsförluster
- två rulltrappssystem med två öppningar i serie med effektiv area 6 m² och 12 m²
- öppet brandgasventilationssystem med flöde 300 m³/s vid tryckfall 2000 Pa
- stängt brandgasventilationssystem med flöde 3 m³/s vid tryckfall 2000 Pa

Dessa 4+4+4+2+1 komponenter bildar tillsammans med stationsvolymen beräkningsmodellen som visas nedan. De norra och södra tågtunnlarna ansluter till station Malmö nedre respektive station Hyllie, vilka båda betraktats som omgivning ovan mark. Station Malmö nedre ansluter till omgivningen ovan mark med två rulltrappssystem och två kortare tågtunnlar. Tryckutjämningschakten ansluts till tågtunnlarna när det återstår 20 m till station Triangeln. Avståndet är egentligen 28, 39, 80 och 128 m, vilket påverkar beräkningsresultatet marginellt. Siffrorna för brandgasventilationssystemet är dimensionerande flödet 300 m³/s med ett antaget tryckfall om 2000 Pa samt att ett stängt brandgasventilationssystem har ett läckage om 3 m³/s vid samma tryckfall.

```
begin
format   o 1 q 1
control  duct=16          con=1      trix=1
set      3000m=d, 7000, 3000, 100  op=t, 0.6  huv=e, 2:qw
set      20ms=d, 7000, 20, 100     opp=op, 6  bvs=t, 2000, 3:qw  es=e, 0
```



Utgångsfall

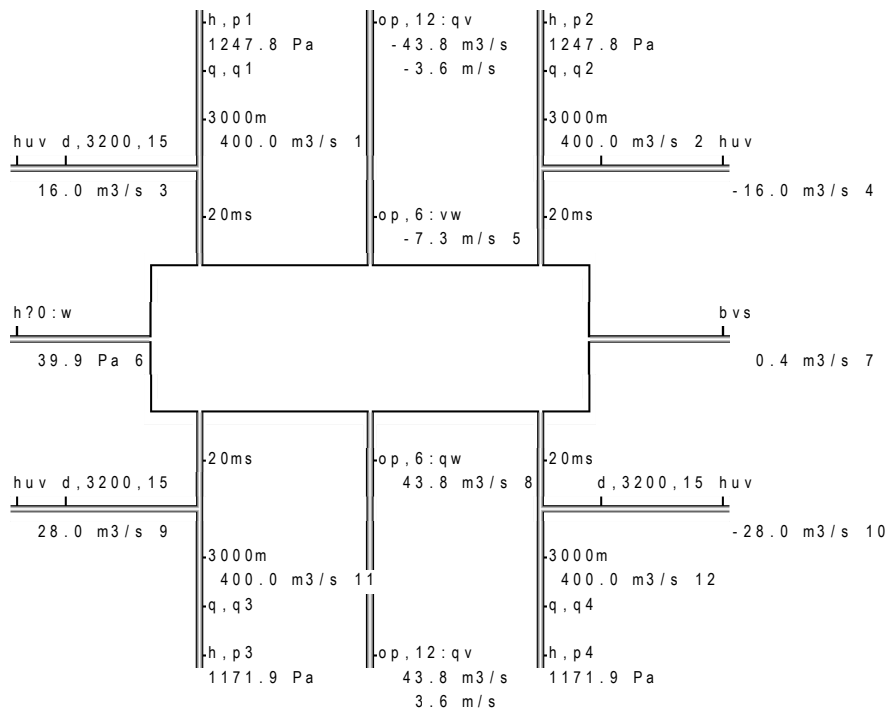
Utgångsfaller innebär att det finns ingen strypning mellan station triangeln och tryckutjämningsschakten, den effektiva nedre öppningsarean för varje rulltrappssystem är 6 m^2 och brandgasventilationssystemet är avstängt med ett läckflöde om $3 \text{ m}^3/\text{s}$ vid nominellt driftstryckfall 2000 Pa. Raden step number anger tågrörelsefall och res(nummer) anger mätdata-punkt, vars nummer finns angivet i grafiken. Siffrorna i grafiken avser fall 9, vars lufthastighet i en perrongdörr är 7.3 m/s från perrongen med ett övertryck på 40 Pa. Fall 4 och 6 med två kommande eller gående tåg skapar en lufthastighet på 15 m/s i en öppen perrongdörr.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res (5)	m/s	0.0	-7.2	6.1	-15.1	-1.9	15.0	-10.5	8.4	-7.3
res (6)	Pa	0.0	38.4	-28.1	170.1	2.6	-169.0	82.7	-52.5	39.9
res (1)	m3/s	0.0	400.0	59.3	400.0	400.0	145.5	400.0	81.1	400.0
res (2)	m3/s	0.0	-70.9	59.3	400.0	-18.3	145.5	400.0	400.0	400.0
res (3)	m3/s	0.0	17.0	31.5	-77.2	35.0	77.2	-44.1	43.0	16.0
res (4)	m3/s	0.0	39.4	-31.5	77.2	10.2	-77.2	44.1	-53.8	-16.0
res (7)	m3/s	0.0	0.4	-0.4	0.9	0.1	-0.9	0.6	-0.5	0.4
res (8)	m3/s	0.0	42.9	-36.7	90.4	11.1	-90.1	63.0	-50.2	43.8
res (9)	m3/s	0.0	-39.4	31.5	-82.8	-10.2	86.8	-57.7	60.6	28.0
res (10)	m3/s	0.0	39.4	-53.9	82.8	-44.4	-86.8	23.4	-60.6	-28.0
res (11)	m3/s	0.0	70.9	-59.3	149.2	18.3	400.0	104.0	400.0	400.0
res (12)	m3/s	0.0	70.9	400.0	149.2	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format   o 1 q 1
control  duct=16  con=1  trix=1
set      3000m=d,7000,3000,100:qw
set      20ms=d,7000,20,100    op=t,0.6  huv=e,2:qw  bvs=t,2000,3:qw

```



Strypning av tunneltvärsnitt

Tvärsnittsarean i strypningen är 0.8 av tunneltvärsnittet. Detta ger en engångsförlust på 0.04 och här använd 0.05. En måttlig strypning i en rak ledning har en litet tryckförlust, eftersom det sker en tryckåtervinning efter strypningen. Raden step number anger tågrörelsefall och res(nummer) anger mätdatapunkt, vars nummer finns angivet i grafiken. Siffrorna i grafiken avser fall 9.

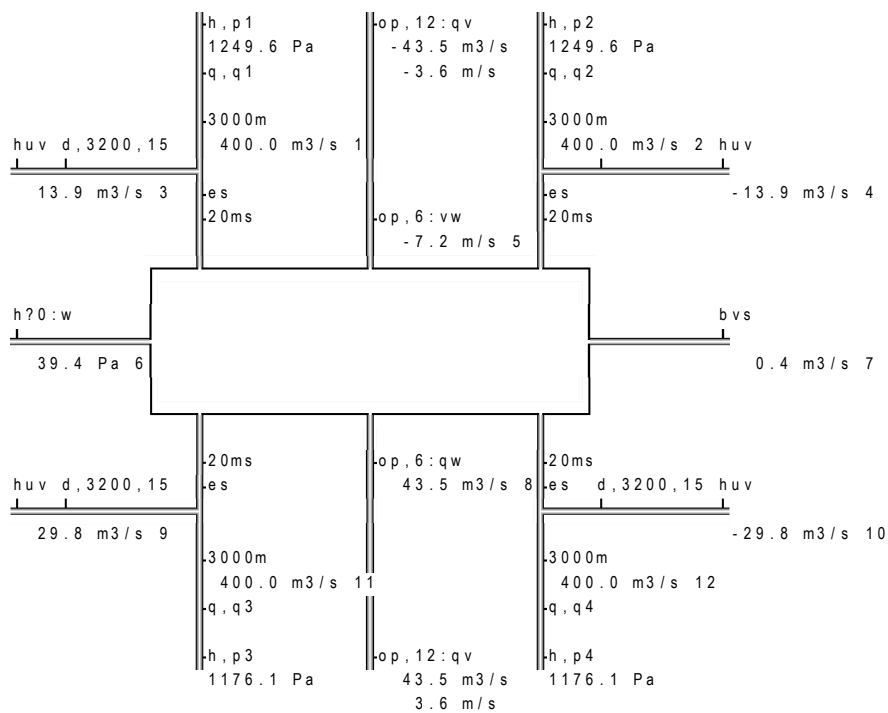
Alla siffror är ytterst snarlika utgångsfalet. Strypningarna har ingen effekt.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(5)	m/s	0.0	-7.1	6.1	-15.1	-1.8	15.0	-10.5	8.4	-7.2
res(6)	Pa	0.0	38.2	-28.1	170.2	2.5	-169.2	83.1	-52.6	39.4
res(1)	m3/s	0.0	400.0	59.1	400.0	400.0	145.2	400.0	80.9	400.0
res(2)	m3/s	0.0	-70.4	59.1	400.0	-18.2	145.2	400.0	400.0	400.0
res(3)	m3/s	0.0	14.7	31.4	-77.9	33.5	77.0	-45.8	43.0	13.9
res(4)	m3/s	0.0	39.1	-31.4	77.9	10.1	-77.0	45.8	-52.6	-13.9
res(7)	m3/s	0.0	0.4	-0.4	0.9	0.1	-0.9	0.6	-0.5	0.4
res(8)	m3/s	0.0	42.8	-36.7	90.4	11.1	-90.1	63.2	-50.2	43.5
res(9)	m3/s	0.0	-39.1	31.4	-82.6	-10.1	87.2	-57.7	61.3	29.8
res(10)	m3/s	0.0	39.1	-54.6	82.6	-45.3	-87.2	19.7	-61.3	-29.8
res(11)	m3/s	0.0	70.4	-59.1	148.7	18.2	400.0	103.9	400.0	400.0
res(12)	m3/s	0.0	70.4	400.0	148.7	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format   o 1 q 1
control  duct=16 con=1 trix=1
set      3000m=d,7000,3000,100:qw      huv=e,2:qw      bvs=t,2000,3:qw
set      20ms=d,7000,20,100            op=t,0.6         es=e,0.05

```



Fördubblad öppning mot perrong

Båda rullstrappssystemens dörröppningars effektiv öppningsarea ändras från 6 m² till 12 m². De övre öppningarnas effektiva öppningsarea är 12 m². Detta innebär att vid lika stora effektiva öppningar uppe och nere blir hastigheten den samma uppe och nere. Större öppningar nere än uppe resulterar i att hastigheten blir störst uppe. Raden step number anger tågrörelsefall och res(nummer) anger mätdatapunkt, vars nummer finns angivet i grafiken. Siffrorna i grafiken avser fall 9.

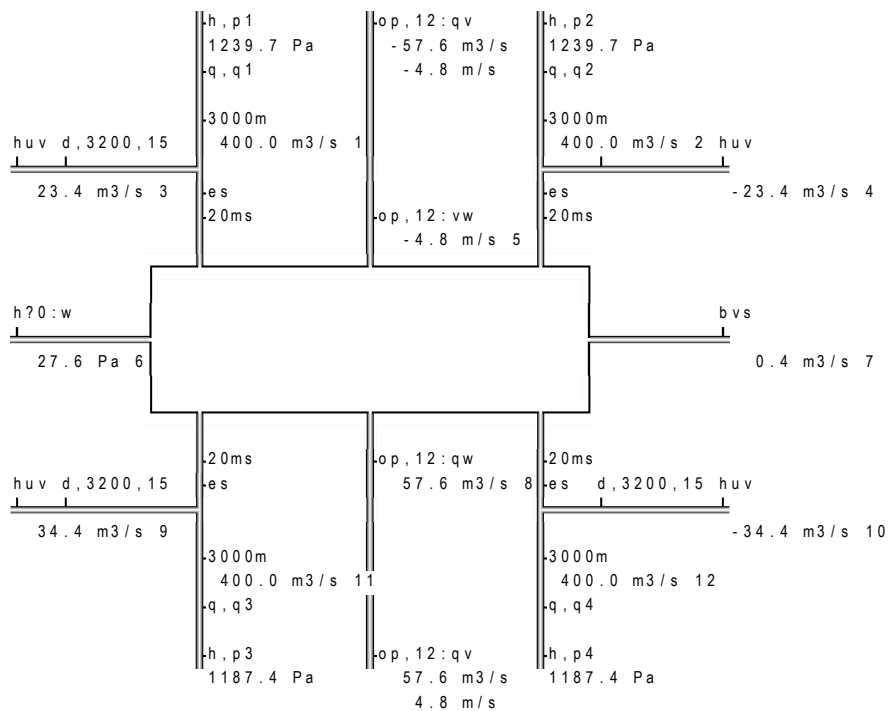
Siffrorna nedan visar att lufthastigheten minskar betydligt med en fördubblad öppning.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(5)	m/s	0.0	-5.1	4.3	-10.6	-1.3	10.4	-7.7	5.6	-4.8
res(6)	Pa	0.0	31.3	-22.5	134.7	1.9	-130.4	70.2	-37.0	27.6
res(1)	m3/s	0.0	400.0	53.0	400.0	400.0	127.8	400.0	68.1	400.0
res(2)	m3/s	0.0	-63.9	53.0	400.0	-15.9	127.8	400.0	400.0	400.0
res(3)	m3/s	0.0	21.3	28.2	-66.1	35.3	67.8	-35.3	36.2	23.4
res(4)	m3/s	0.0	35.5	-28.2	66.1	8.8	-67.8	35.3	-49.1	-23.4
res(7)	m3/s	0.0	0.4	-0.3	0.8	0.1	-0.8	0.6	-0.4	0.4
res(8)	m3/s	0.0	61.3	-51.9	127.1	15.2	-125.1	91.8	-66.7	57.6
res(9)	m3/s	0.0	-35.5	28.2	-73.7	-8.8	78.9	-53.2	56.4	34.4
res(10)	m3/s	0.0	35.5	-52.3	73.7	-44.6	-78.9	-3.9	-56.4	-34.4
res(11)	m3/s	0.0	63.9	-53.0	132.7	15.9	400.0	95.8	400.0	400.0
res(12)	m3/s	0.0	63.9	400.0	132.7	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format   o 1 q 1
control  duct=16 con=1 trix=1
set      3000m=d,7000,3000,100:qw      huv=e,2:qw      bvs=t,2000,3:qw
set      20ms=d,7000,20,100            op=t,0.6        es=e,0

```



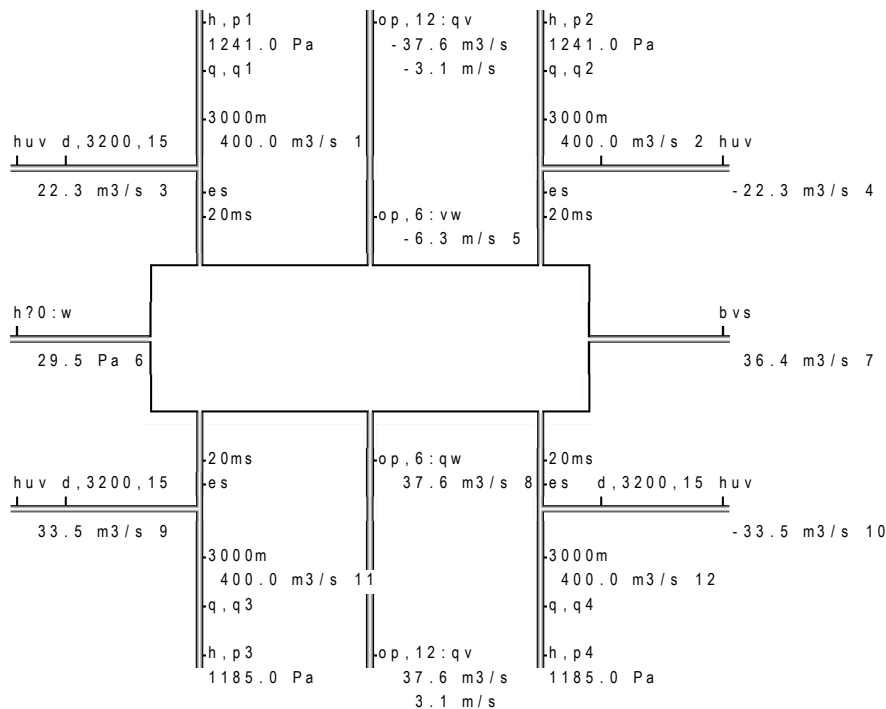
Öppet brandgasventilationssystem

Brandgasventilationssystemet antas ha ett nominellt driftstryckfall på 2000 Pa vid flödet 300 m³/s. Brandgasventilationssystemet med öppna spjäll beräknas som motstånd med just tryckfall 2000 Pa vid flödet 300 m³/s. Flödet sätts till 3 m³/s för fallet med stängda spjäll. Raden step number anger tågrörelsefall och res(nummer) anger mätdatapunkt, vars nummer finns angivet i grafiken. Siffrorna i grafiken avser fall 9.

Alla siffror ligger storleksmässigt något under utgångsfallet.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(5)	m/s	0.0	-6.6	5.6	-13.7	-1.6	13.5	-9.8	7.2	-6.3
res(6)	Pa	0.0	32.4	-23.3	140.0	2.0	-136.1	72.4	-39.2	29.5
res(1)	m3/s	0.0	400.0	54.0	400.0	400.0	130.6	400.0	70.1	400.0
res(2)	m3/s	0.0	-65.1	54.0	400.0	-16.2	130.6	400.0	400.0	400.0
res(3)	m3/s	0.0	20.7	28.7	-67.9	35.3	69.3	-37.1	37.2	22.3
res(4)	m3/s	0.0	36.1	-28.7	67.9	9.0	-69.3	37.1	-49.8	-22.3
res(7)	m3/s	0.0	38.2	-32.4	79.4	9.6	-78.3	57.1	-42.0	36.4
res(8)	m3/s	0.0	39.4	-33.5	82.0	9.9	-80.8	59.0	-43.4	37.6
res(9)	m3/s	0.0	-36.1	28.7	-75.1	-9.0	80.2	-54.0	57.1	33.5
res(10)	m3/s	0.0	36.1	-52.5	75.1	-44.6	-80.2	-0.6	-57.1	-33.5
res(11)	m3/s	0.0	65.1	-54.0	135.3	16.2	400.0	97.3	400.0	400.0
res(12)	m3/s	0.0	65.1	400.0	135.3	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```
begin
format      o 1 q 1
control     duct=16  con=1  trix=1
set         3000m=d,7000,3000,100:qw      huv=e,2:qw      bvs=t,2000,300:qw
set         20ms=d,7000,20,100             op=t,0.6        es=e,0
```



Alla tre åtgärder

Detta fall ger givetvis bäst resultat med lägsta hastighet i dörröppning mellan rulltrappssystem och perrong. Raden step number anger tågrörelsefall och res(nummer) anger mätdatapunkt, vars nummer finns angivet i grafiken. Siffrorna i grafiken avser fall 9.

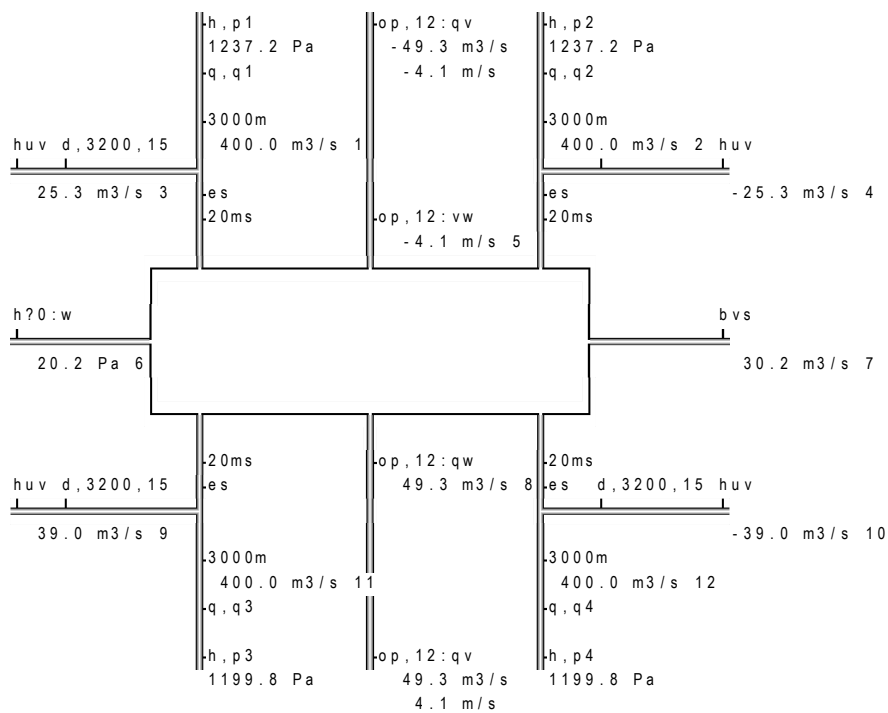
Alla siffror ligger storleksmässigt något under fallet med fördubblad öppning mot perrong.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(5)	m/s	0.0	-4.7	4.0	-9.7	-1.1	9.5	-7.1	4.9	-4.1
res(6)	Pa	0.0	26.6	-19.0	113.2	1.5	-107.6	60.3	-28.8	20.2
res(1)	m3/s	0.0	400.0	48.6	400.0	400.0	115.7	400.0	59.9	400.0
res(2)	m3/s	0.0	-58.8	48.6	400.0	-14.1	115.7	400.0	400.0	400.0
res(3)	m3/s	0.0	21.9	25.8	-59.1	33.9	61.4	-28.3	31.8	25.3
res(4)	m3/s	0.0	32.7	-25.8	59.1	7.9	-61.4	28.3	-45.1	-25.3
res(7)	m3/s	0.0	34.6	-29.2	71.4	8.3	-69.6	52.1	-36.0	30.2
res(8)	m3/s	0.0	56.5	-47.8	116.6	13.6	-113.6	85.1	-58.8	49.3
res(9)	m3/s	0.0	-32.7	25.8	-67.3	-7.9	74.5	-49.2	54.8	39.0
res(10)	m3/s	0.0	32.7	-52.0	67.3	-45.6	-74.5	-16.6	-54.8	-39.0
res(11)	m3/s	0.0	58.8	-48.6	121.3	14.1	400.0	88.5	400.0	400.0
res(12)	m3/s	0.0	58.8	400.0	121.3	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format   o 1 q 1
control  duct=16 con=1 trix=1
set      3000m=d,7000,3000,100:qw      huv=e,2:qw      bvs=t,2000,300:qw
set      20ms=d,7000,20,100            op=t,0.6        es=e,0.05

```



Sammanfattning av resultat

Värsta tågrörelse är fall 4 och fall 6 med två tåg mot station Triangeln och omvänt med två tåg ut från station Triangeln. Tågrörelse fall 7 och 8 med tre södergående tåg kommer som trea och fyra. Hastigheten i öppningen mellan rulltrappssystem och perrong redovisas i Tabell 2.2 nedan.

Tabell 2.2 Lufthastighet i m/s i öppning mot perrong

Åtgärdsfall \ tågfall	4	6	7	8
Inga åtgärder	-15.1	15.0	-10.5	8.4
Strypning mellan station och tryckutjämningschakt	-15.1	15.0	-10.5	8.4
Fördubblad öppningsarea mot perrong	-10.6	10.4	-7.7	5.6
Öppet brandgasventilationssystem	-13.7	13.5	-9.8	7.2
Alla åtgärder	-9.7	9.5	-7.1	4.9

Slutsatsen från Tabell 2.2 är att en fördubblad öppningsarea mellan rulltrappssystem och perrong ger bäst resultat. Hastigheten halveras inte, eftersom allt utflöde från station Triangeln inte passerar rulltrappssystemet. Notera att rulltrappssystemet har två seriekopplade öppningar. Den minsta öppningen blir den mest kritiska.

Strypning i tunnlarna intill station Triangeln har ingen effekt. Strypning i en tågförande tunnel gör nytta, men samma strypning i övriga tre tunnlarna försvårar tryckutjämnning. Sammantaget har åtgärden med strypning ingen verkan.

Ett öppet brandgasventilationssystem ger en mindre effekt och motsvaras av en öppningsarea om 5.2 m^2 , vilket kan jämföras med 5.4 m^2 för ett rulltrappssystem med 6 m^2 och 12 m^2 i serie för de två dörrpassagerna. Om brandgasventilationssystemets tryckfall är endast 500 Pa, motsvarar ett öppet brandgasventilationssystem nästan två rulltrappssystem.

3 Andra åtgärder och tester

I detta avsnitt redovisas för samma nio tågfall som använts tidigare två rulltrappssystem med tre olika strypningar enligt Tabell 3.1. Detta ökar luftmotståndet för rulltrappssystemen och därmed minskar luftflödet och lufthastigheten.

Vad som händer när olika antal perrongdörrar för utgångsfallet stängs, undersöks på samma sätt. Det finns fyra perrongdörrar med en effektiv area om 3 m^2 . De fall som testas är att stänga en, två, tre och alla fyra perrongdörrar. Fallet med alla dörrar stängda beräknas med en öppning 0.3 m^2 för varje perronggäde. En gläntad perrongdörr kan ha en öppningsarea 3 m^2 .

Lufthastigheten i en öppen perrongdörr sammanställs för de sju testfall i Tabell 3.1 nedan.

Tabell 3.1 Lufthastighet i m/s i öppning mot perrong

Åtgärdsfall \ tågfall		4	6	7	8
Utgångsfall	(6-12) m^2	-15.1	15.0	-10.5	8.4
Rulltrappssystem med strypt övre strypning	(6-6) m^2	-12.5	12.5	-8.7	7.1
Rulltrappssystem med en extra strypning	(6-6-12) m^2	-11.9	11.9	-8.3	6.8
Rulltrappssystem med två extra strypningar	(6-6-6-12) m^2	-10.2	10.2	-7.1	5.9
Tre öppna perrongdörrar	(3+3+3+0) m^2	-17.2	17.2	-11.9	9.8
Två öppna perrongdörrar	(3+0+3+0) m^2	-18.1	18.3	-12.6	10.6
En öppna perrongdörrar	(3+0+0+0) m^2	-19.4	19.7	-13.6	11.8
Fyra stängda perrongdörrar	(0.3+0+0.3+0) m^2	-21.1	21.6	-14.9	13.3

Det krävs en viss kraft för att kunna öppna en dörr mot ett övertryck. Kraften är för närvarande begränsad till 133 N. Framtida bestämmelser kan ange lägre öppningskrafter. Om friktion sätts till 53 N återstår 80 N för att balansera tryckkraften. Högsta tillåtna tryckskillnad blir 80 Pa för ett dörrblad med ytan 2 m^2 . Dörrhandtaget på dörrkanten ger en hävstångseffekt med en utväxling på två gentemot tryckkraften verkande i dörrbladets mittpunkt.

Rulltrappssystem med strypt övre öppning

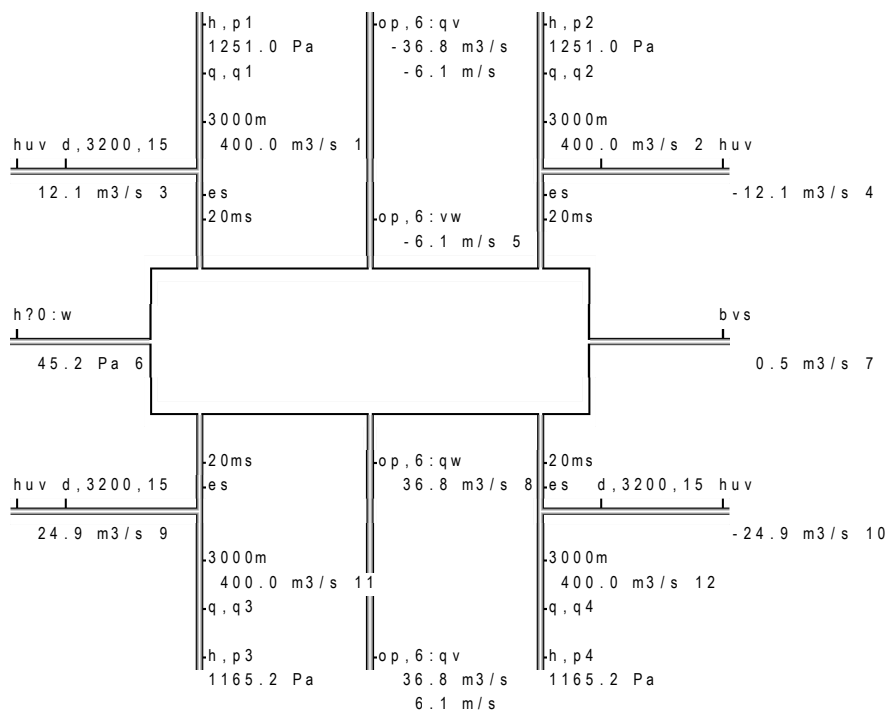
Rulltrappssystemet för utgångsfallet har två strypningar eller öppningar om 6 m^2 respektive 12 m^2 effektiv area. Den övre öppningen stryps till 6 m^2 . Detta ökar strömningsmotståndet, vilket minskar flödet. Detta medför att lufthastigheten i öppningar minskar till 12.5 m/s jämfört med utgångsfallet. Tryckskillnaden mellan för station Triangeln och omgivningen ovan mark ökar något från 170 Pa till 187 Pa . Detta beror på att tryckutjämningen försvåras, eftersom rulltrappssystemen stryps.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(5)	m/s	0.0	-5.9	5.1	-12.5	-1.6	12.5	-8.7	7.1	-6.1
res(6)	Pa	0.0	41.5	-30.6	186.5	2.9	-187.1	90.2	-60.3	45.2
res(1)	m3/s	0.0	400.0	61.9	400.0	400.0	153.1	400.0	86.9	400.0
res(2)	m3/s	0.0	-73.7	61.9	400.0	-19.4	153.1	400.0	400.0	400.0
res(3)	m3/s	0.0	14.8	32.9	-81.9	34.9	81.3	-48.2	46.1	12.1
res(4)	m3/s	0.0	40.9	-32.9	81.9	10.8	-81.3	48.2	-56.0	-12.1
res(7)	m3/s	0.0	0.4	-0.4	0.9	0.1	-0.9	0.6	-0.5	0.5
res(8)	m3/s	0.0	35.3	-30.3	74.8	9.3	-74.9	52.0	-42.5	36.8
res(9)	m3/s	0.0	-40.9	32.9	-86.7	-10.8	90.3	-60.3	62.7	24.9
res(10)	m3/s	0.0	40.9	-54.6	86.7	-44.3	-90.3	30.1	-62.7	-24.9
res(11)	m3/s	0.0	73.7	-61.9	156.2	19.4	400.0	108.6	400.0	400.0
res(12)	m3/s	0.0	73.7	400.0	156.2	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format   o 1 q 1
control  duct=16 con=1 trix=1
set      3000m=d,7000,3000,100:qw      huv=e,2:qw      bvs=t,2000,3:qw
set      20ms=d,7000,20,100            op=t,0.6        es=e,0

```



Rulltrappssystem med en extra strypning

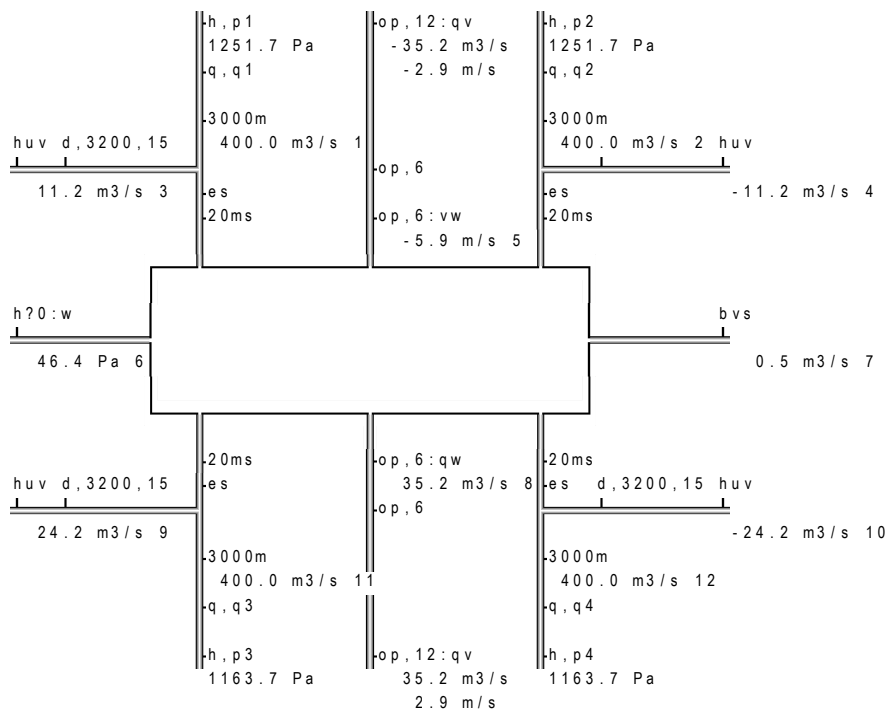
Rulltrappssystemet för utgångsfallet har två strypningar eller öppningar om 6 m^2 respektive 12 m^2 effektiv area. En extra öppning om 6 m^2 adderas i serie med de två övriga. Detta ökar strömningsmotståndet, vilket minskar flödet något samtidigt som tryckfallet fördelas över tre öppningar i serie. Detta medför att lufthastigheten i öppningar med den effektiva arean 6 m^2 för värsta tågfall 4 minskar från 15.1 m/s till 11.9 m/s . Tryckskillnaden mellan för station Triangeln och omgivningen ovan mark ökar något från 170 Pa till 191 Pa . Detta beror på att tryckutjämningen försvåras, eftersom rulltrappssystemen strypts.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(5)	m/s	0.0	-5.6	4.8	-11.9	-1.5	11.9	-8.3	6.8	-5.9
res(6)	Pa	0.0	42.2	-31.2	190.3	3.0	-191.4	92.0	-62.2	46.4
res(1)	m3/s	0.0	400.0	62.5	400.0	400.0	154.8	400.0	88.3	400.0
res(2)	m3/s	0.0	-74.3	62.5	400.0	-19.7	154.8	400.0	400.0	400.0
res(3)	m3/s	0.0	14.3	33.2	-82.9	34.9	82.2	-49.1	46.9	11.2
res(4)	m3/s	0.0	41.3	-33.2	82.9	10.9	-82.2	49.1	-56.6	-11.2
res(7)	m3/s	0.0	0.4	-0.4	0.9	0.1	-0.9	0.6	-0.5	0.5
res(8)	m3/s	0.0	33.6	-28.9	71.2	8.9	-71.4	49.5	-40.7	35.2
res(9)	m3/s	0.0	-41.3	33.2	-87.6	-10.9	91.1	-60.9	63.2	24.2
res(10)	m3/s	0.0	41.3	-54.8	87.6	-44.3	-91.1	31.6	-63.2	-24.2
res(11)	m3/s	0.0	74.3	-62.5	157.8	19.7	400.0	109.7	400.0	400.0
res(12)	m3/s	0.0	74.3	400.0	157.8	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format   o 1 q 1
control  duct=16 con=1 trix=1
set      3000m=d,7000,3000,100:qw      huv=e,2:qw      bvs=t,2000,3:qw
set      20ms=d,7000,20,100            op=t,0.6        es=e,0

```



Rulltrappssystem med två extra strypningar

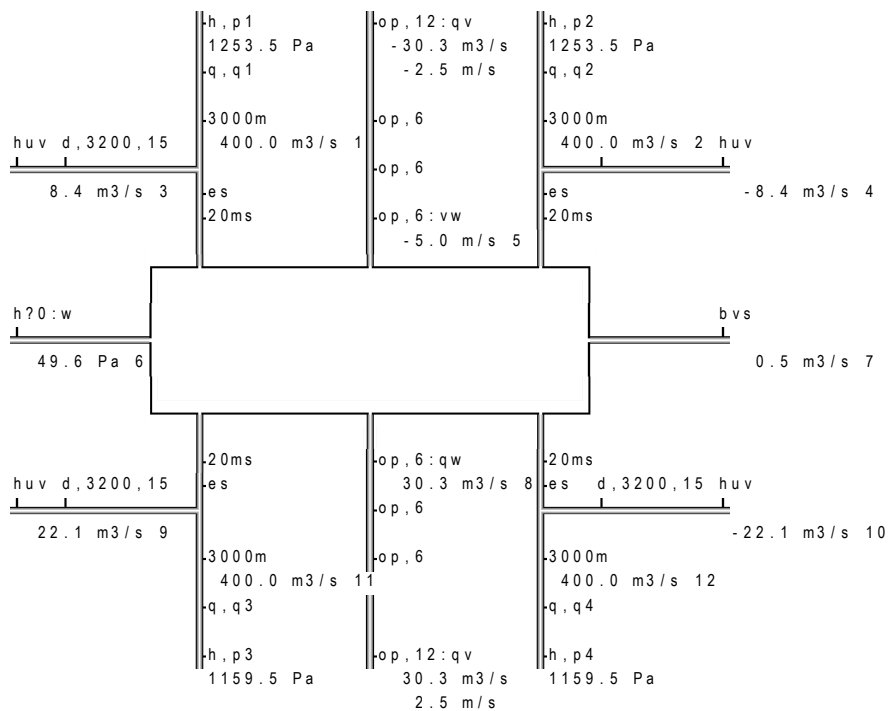
Rulltrappssystemet för utgångsfallet har två strypningar eller öppningar om 6 m^2 respektive 12 m^2 effektiv area. Två extra öppningar om 6 m^2 adderas i serie med de två övriga. Detta ökar strömningsmotståndet, vilket minskar flödet något samtidigt som tryckfallet fördelas över tre öppningar i serie. Detta medför att lufthastigheten i öppningar med den effektiva arean 6 m^2 för värsta tågfall 4 minskar från 15.1 m/s till 10.2 m/s . Tryckskillnaden mellan för station Triangeln och omgivningen ovan mark ökar något från 170 Pa till 203 Pa . Detta beror på att tryckutjämningen försvåras, eftersom rulltrappssystemen strypas.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res (5)	m/s	0.0	-4.8	4.1	-10.2	-1.3	10.2	-7.1	5.9	-5.0
res (6)	Pa	0.0	44.3	-33.0	201.7	3.2	-204.0	97.5	-68.0	49.6
res (1)	m3/s	0.0	400.0	64.2	400.0	400.0	159.9	400.0	92.3	400.0
res (2)	m3/s	0.0	-76.1	64.2	400.0	-20.4	159.9	400.0	400.0	400.0
res (3)	m3/s	0.0	12.8	34.1	-85.9	34.8	84.8	-51.7	49.0	8.4
res (4)	m3/s	0.0	42.3	-34.1	85.9	11.4	-84.8	51.7	-58.2	-8.4
res (7)	m3/s	0.0	0.4	-0.4	1.0	0.1	-1.0	0.7	-0.6	0.5
res (8)	m3/s	0.0	28.6	-24.7	61.0	7.7	-61.4	42.4	-35.4	30.3
res (9)	m3/s	0.0	-42.3	34.1	-90.2	-11.4	93.4	-62.7	64.6	22.1
res (10)	m3/s	0.0	42.3	-55.3	90.2	-44.2	-93.4	35.5	-64.6	-22.1
res (11)	m3/s	0.0	76.1	-64.2	162.4	20.4	400.0	112.9	400.0	400.0
res (12)	m3/s	0.0	76.1	400.0	162.4	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format   o 1 q 1
control  duct=16 con=1 trix=1
set      3000m=d,7000,3000,100:qw      huv=e,2:qw      bvs=t,2000,3:qw
set      20ms=d,7000,20,100             op=t,0.6        es=e,0

```



Tre öppna perrongdörrar

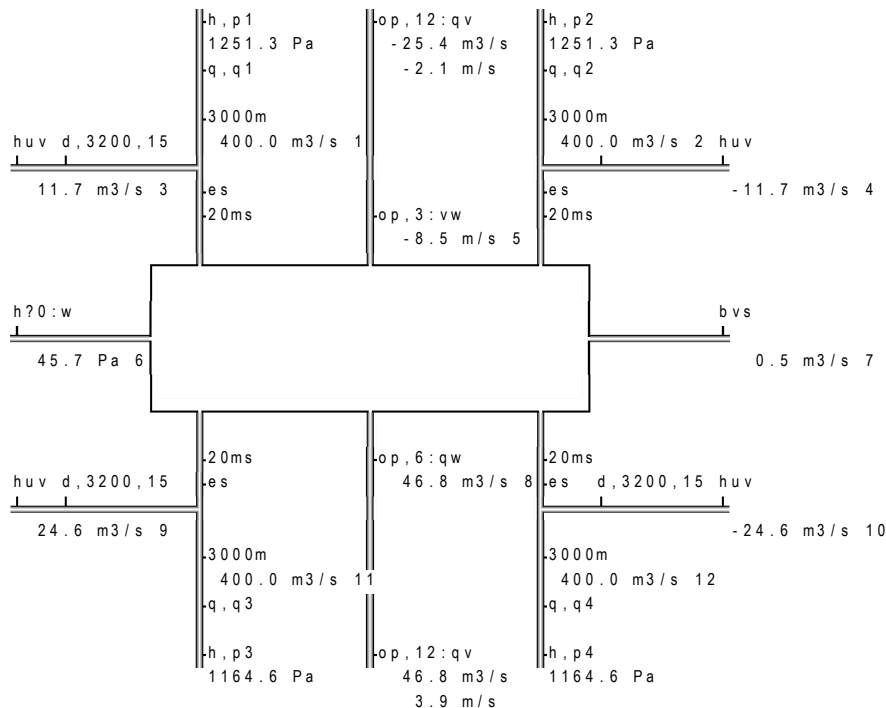
De två rulltrappssystemen har vars två perrongdörrar med en effektiv öppningsarea om 3 m^2 . Perrongdörrarna skall normalt vara öppna, men här undersöks om en perrongdörr är stängd, vilket minskar tryckutjämningsmöjligheterna något och därmed ökar lufthastigheten i övriga öppna perrongdörrar. Resultatet blir för tågfall 4 en tryckskillnad på 188 Pa och en lufthastighet på 17.2 m/s i en öppen perrongdörr.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(5)	m/s	0.0	-8.1	7.0	-17.2	-2.1	17.2	-11.9	9.8	-8.5
res(6)	Pa	0.0	41.8	-30.9	188.1	2.9	-188.9	90.9	-61.1	45.7
res(1)	m3/s	0.0	400.0	62.2	400.0	400.0	153.8	400.0	87.5	400.0
res(2)	m3/s	0.0	-73.9	62.2	400.0	-19.5	153.8	400.0	400.0	400.0
res(3)	m3/s	0.0	14.6	33.0	-82.3	34.9	81.6	-48.5	46.4	11.7
res(4)	m3/s	0.0	41.1	-33.0	82.3	10.9	-81.6	48.5	-56.3	-11.7
res(7)	m3/s	0.0	0.4	-0.4	0.9	0.1	-0.9	0.6	-0.5	0.5
res(8)	m3/s	0.0	44.8	-38.5	95.0	11.9	-95.2	66.1	-54.2	46.8
res(9)	m3/s	0.0	-41.1	33.0	-87.1	-10.9	90.6	-60.6	62.9	24.6
res(10)	m3/s	0.0	41.1	-54.7	87.1	-44.3	-90.6	30.8	-62.9	-24.6
res(11)	m3/s	0.0	73.9	-62.2	156.9	19.5	400.0	109.0	400.0	400.0
res(12)	m3/s	0.0	73.9	400.0	156.9	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format      o 1 q 1
control     duct=16 con=1 trix=1
set         3000m=d,7000,3000,100:qw      huv=e,2:qw      bvs=t,2000,3:qw
set         20ms=d,7000,20,100            op=t,0.6        es=e,0

```



Två öppna perrongdörrar

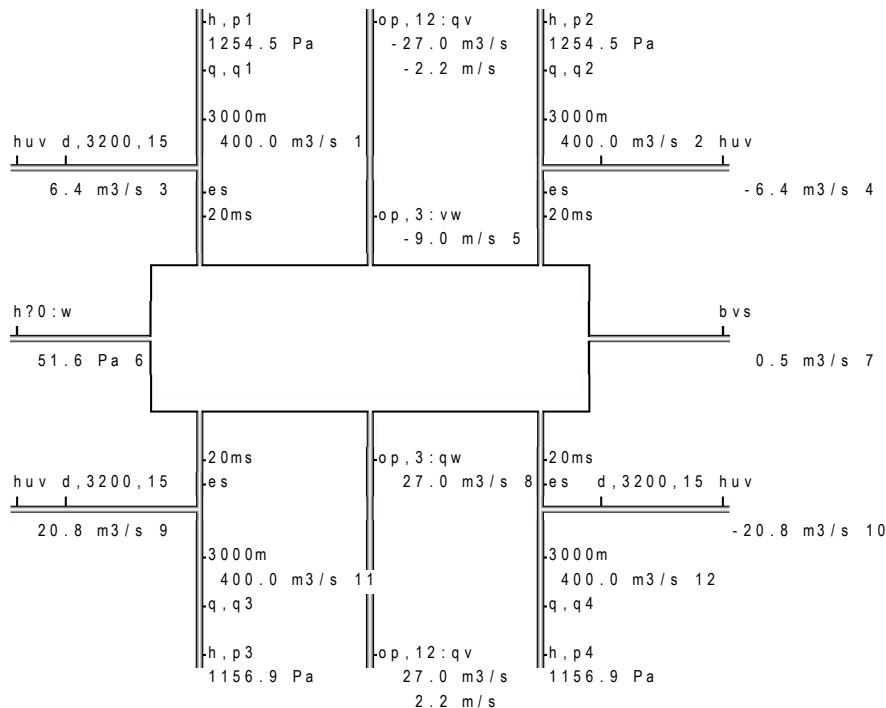
De två rulltrappssystemen har vars två perrongdörrar med en effektiv öppningsarea om 3 m². Perrong dörrarna skall normalt vara öppna, men här undersöks om varje rulltrappssystem har en stängd perrongdörr, vilket minskar tryckutjämningsmöjligheterna något och därmed ökar lufthastigheten i övriga öppna perrongdörrar. Resultatet blir för tågfall 4 en tryckskillnad på 209 Pa och en lufthastighet på 18.1 m/s i en öppen perrongdörr.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res (5)	m/s	0.0	-8.5	7.3	-18.1	-2.3	18.3	-12.6	10.6	-9.0
res (6)	Pa	0.0	45.7	-34.1	209.2	3.3	-212.5	101.4	-71.9	51.6
res (1)	m3/s	0.0	400.0	65.3	400.0	400.0	163.2	400.0	94.9	400.0
res (2)	m3/s	0.0	-77.3	65.3	400.0	-20.9	163.2	400.0	400.0	400.0
res (3)	m3/s	0.0	11.7	34.7	-87.9	34.7	86.6	-53.3	50.4	6.4
res (4)	m3/s	0.0	42.9	-34.7	87.9	11.6	-86.6	53.3	-59.2	-6.4
res (7)	m3/s	0.0	0.5	-0.4	1.0	0.1	-1.0	0.7	-0.6	0.5
res (8)	m3/s	0.0	25.4	-21.9	54.3	6.9	-54.8	37.8	-31.9	27.0
res (9)	m3/s	0.0	-42.9	34.7	-91.8	-11.6	95.0	-63.9	65.6	20.8
res (10)	m3/s	0.0	42.9	-55.6	91.8	-44.2	-95.0	38.0	-65.6	-20.8
res (11)	m3/s	0.0	77.3	-65.3	165.4	20.9	400.0	115.1	400.0	400.0
res (12)	m3/s	0.0	77.3	400.0	165.4	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format o 1 q 1
control duct=16 con=1 trix=1
set 3000m=d,7000,3000,100:qw huv=e,2:qw bvs=t,2000,3:qw
set 20ms=d,7000,20,100 op=t,0.6 es=e,0

```



En öppen perrongdörrar

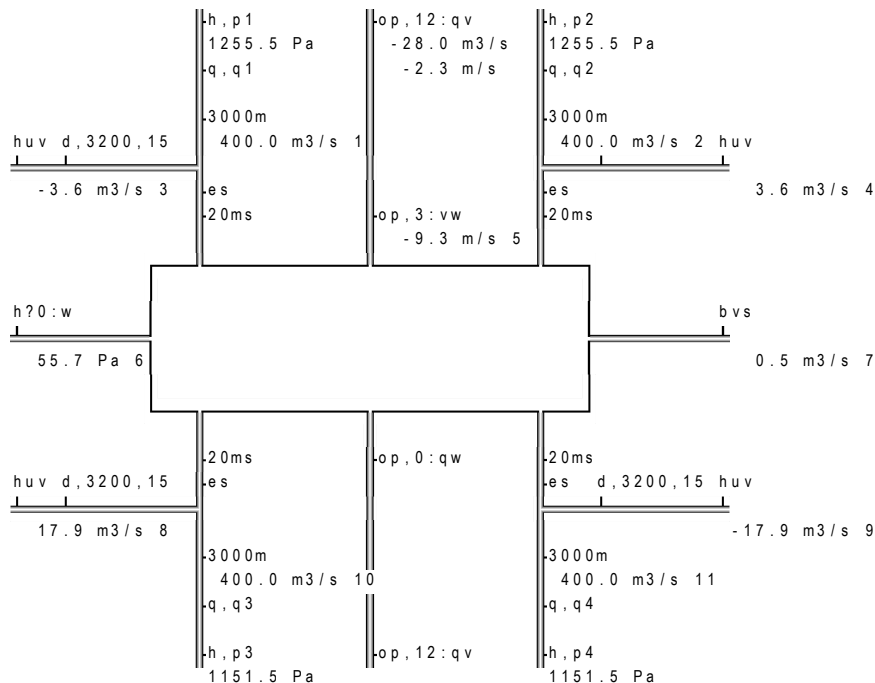
De två rulltrappssystemen har vars två perrongdörrar med en effektiv öppningsarea om 3 m^2 . Perrong dörrarna skall normalt vara öppna, men här undersöks om tre perrongdörrar är stängda, vilket minskar tryckutjämningsmöjligheterna något och därmed ökar lufthastigheten i övriga öppna perrongdörrar. Resultatet blir för tågfall 4 en tryckskillnad på 239 Pa och en lufthastighet på 19.4 m/s i en öppen perrongdörr.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(5)	m/s	0.0	-8.9	7.8	-19.4	-2.5	19.7	-13.6	11.8	-9.3
res(6)	Pa	0.0	50.7	-38.6	239.3	4.0	-246.5	117.1	-88.6	55.7
res(1)	m3/s	0.0	400.0	69.5	400.0	400.0	175.7	400.0	105.3	400.0
res(2)	m3/s	0.0	-81.4	69.5	400.0	-22.8	175.7	400.0	400.0	400.0
res(3)	m3/s	0.0	7.3	36.9	-95.3	34.5	93.3	-59.8	55.9	-3.6
res(4)	m3/s	0.0	45.2	-36.9	95.3	12.7	-93.3	59.8	-63.6	3.6
res(7)	m3/s	0.0	0.5	-0.4	1.0	0.1	-1.1	0.7	-0.6	0.5
res(8)	m3/s	0.0	-45.2	36.9	-98.2	-12.7	101.0	-68.7	69.6	17.9
res(9)	m3/s	0.0	45.2	-56.9	98.2	-44.0	-101.0	46.6	-69.6	-17.9
res(10)	m3/s	0.0	81.4	-69.5	176.9	22.8	400.0	123.8	400.0	400.0
res(11)	m3/s	0.0	81.4	400.0	176.9	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0
result										

```

begin
format o 1 q 1
control duct=16 con=1 trix=1
set 3000m=d,7000,3000,100:qw huv=e,2:qw bvs=t,2000,3:qw
set 20ms=d,7000,20,100 op=t,0.6 es=e,0

```



Alla fyra perrongdörrar stängda

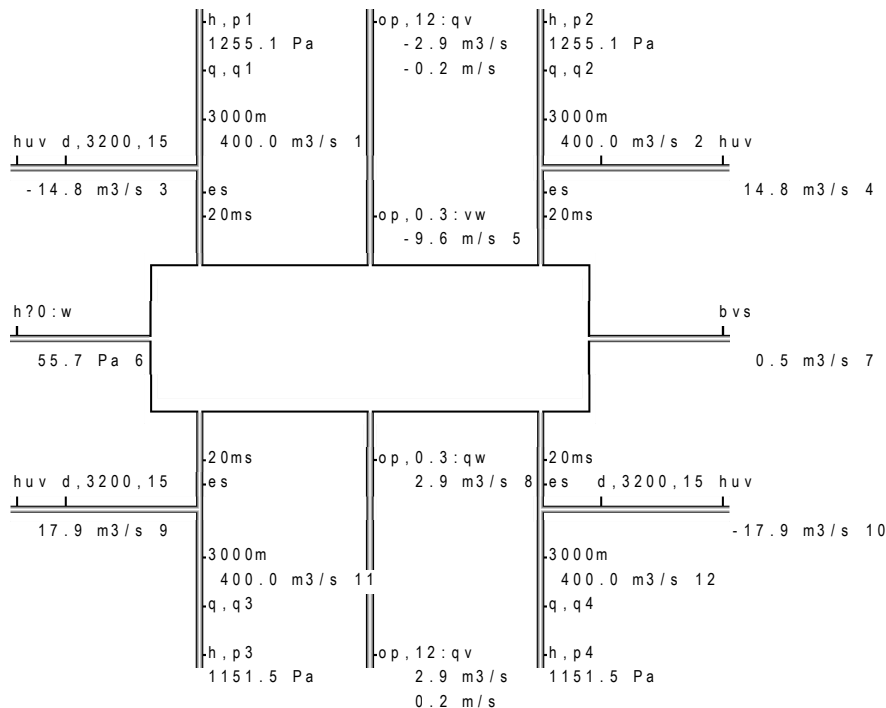
De två rulltrappssystemen har vars två perrongdörrar med en effektiv öppningsarea om 3 m². Perrong dörrarna skall normalt vara öppna, men här undersöks om alla perrongdörrar är stängda, vilket minskar tryckutjämningsmöjligheterna något och ökar tryckskillnad över det stängda perrongdörrar. Resultatet blir för tågfall 4 en tryckskillnad på 268 Pa och en lufthastighet på 21.1 m/s i en öppning på 0.3 m², vilket kan motsvara en gläntad dörrhalva.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res (5)	m/s	0.0	-9.6	8.5	-21.1	-2.8	21.6	-14.9	13.3	-9.6
res (6)	Pa	0.0	55.1	-42.9	268.1	4.6	-279.6	133.3	-105.9	55.7
res (1)	m3/s	0.0	400.0	73.3	400.0	400.0	187.2	400.0	115.2	400.0
res (2)	m3/s	0.0	-84.9	73.3	400.0	-24.5	187.2	400.0	400.0	400.0
res (3)	m3/s	0.0	2.4	38.9	-101.9	34.2	99.3	-65.6	61.1	-14.8
res (4)	m3/s	0.0	47.1	-38.9	101.9	13.6	-99.3	65.6	-67.9	14.8
res (7)	m3/s	0.0	0.5	-0.4	1.1	0.1	-1.1	0.8	-0.7	0.5
res (8)	m3/s	0.0	2.9	-2.5	6.3	0.8	-6.5	4.5	-4.0	2.9
res (9)	m3/s	0.0	-47.1	38.9	-104.0	-13.6	106.5	-73.3	73.6	17.9
res (10)	m3/s	0.0	47.1	-38.9	104.0	-43.8	-106.5	53.7	-73.6	-17.9
res (11)	m3/s	0.0	84.9	-73.3	187.3	24.5	400.0	132.0	400.0	400.0
res (12)	m3/s	0.0	84.9	400.0	187.3	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format o 1 q 1
control duct=16 con=1 trix=1
set 3000m=d,7000,3000,100:qw huv=e,2:qw bvs=t,2000,3:qw
set 20ms=d,7000,20,100 op=t,0.6 es=e,0

```



4 Brandgasventilation i drift

Normal tågtrafik

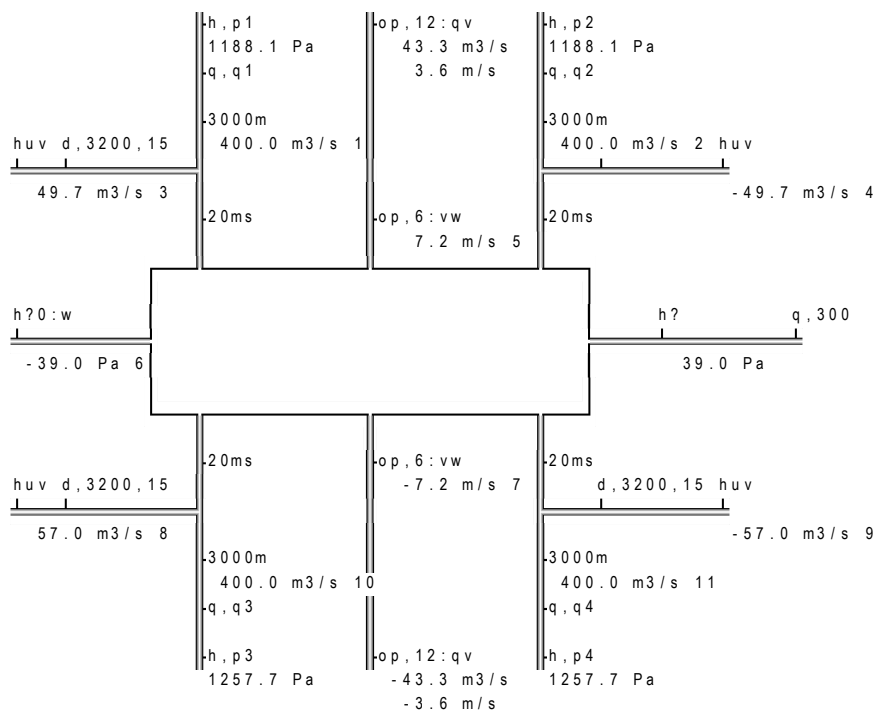
Detta fall kan ses som en demonstration av vad som kan inträffa om brandgasventilationssystemet driftsätts med tågtrafik. De nio tågfallen genomräknas och resultatet redovisas nedan och med kommentarer på nästa sida. Brandgasventilation i drift utan tågrörelser ges av fall 1.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(5)	m/s	4.2	-2.3	11.1	-9.9	4.9	20.9	-6.4	16.0	7.2
res(6)	Pa	-13.3	4.0	-93.0	73.6	-18.3	-328.2	30.9	-193.1	-39.0
res(7)	m/s	-4.2	2.3	-11.1	9.9	-4.9	-20.9	6.4	-16.0	-7.2
res(1)	m3/s	40.7	400.0	107.9	400.0	400.0	202.8	400.0	155.5	400.0
res(2)	m3/s	40.7	-22.9	107.9	400.0	47.9	202.8	400.0	400.0	400.0
res(3)	m3/s	21.6	34.4	57.3	-38.0	42.9	107.6	21.5	82.5	49.7
res(4)	m3/s	-21.6	12.7	-57.3	38.0	-25.4	-107.6	-21.5	-86.5	-49.7
res(8)	m3/s	21.6	-12.7	57.3	-54.5	25.4	114.1	-35.3	91.4	57.0
res(9)	m3/s	-21.6	12.7	-70.7	54.5	-51.0	-114.1	-32.8	-91.4	-57.0
res(10)	m3/s	-40.7	22.9	-107.9	98.1	-47.9	400.0	63.6	400.0	400.0
res(11)	m3/s	-40.7	22.9	400.0	98.1	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format   o 1 q 1
control  duct=16 con=1 trix=1
set      3000m=d,7000,3000,100:qw
set      20ms=d,7000,20,100 op=t,0.6 huv=e,2:qw

```



Fall 6 och 8 resulterar i lufthastigheterna 20.9 m/s respektive 16.0 m/s. Båda fallen har två utgående tåg och ett inkommande tåg för fall 8. Brandgasventilationsflödet 300 m³/s motsvarar nästan ett utgående tåg. Fall 3 med ett utgående tåg har lufthastigheten 11.1 m/s.

Öppna och stängda perrongdörrar och tryckutjämningschakt

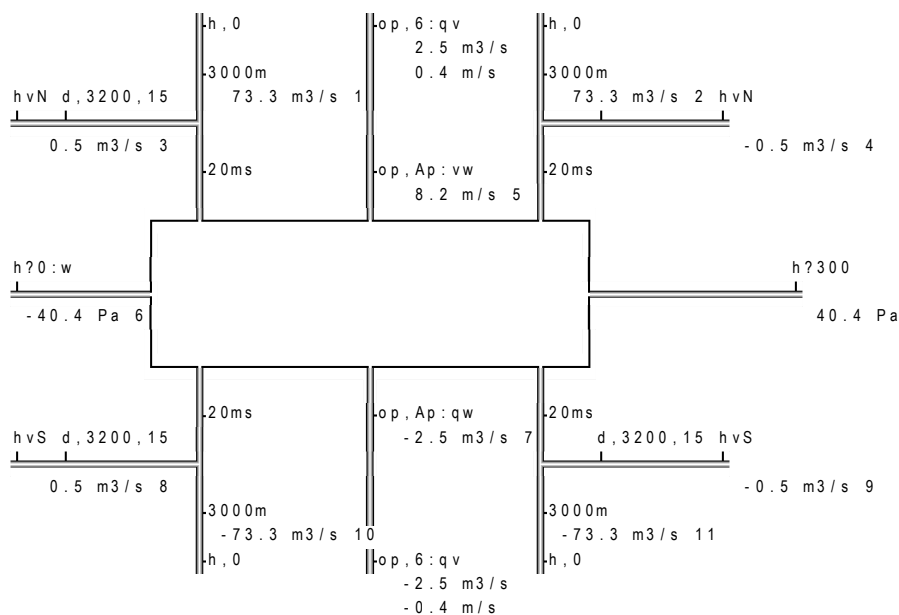
Denna beräkning redovisar nio olika fall med brandgasventilation i drift utan några tågrörelser. De nio fallen är alla kombinationer mellan tre olika perrongdörröppningar och tre fall med tryckutjämningschakt. De tre perrongdörröppningarna anges med parametern A_p och är 6, 3 och 0.3 m². De tre schaktfallen är alla öppna, endast de södra är öppna och alla stängda samt påverkas med parametrarna A_N och A_S , vilka är 8.04 eller 0.08 m². Fall 5 har $A_p=3$ m², $A_N=0.08$ m² och $A_S=8.04$ m². Lufthastigheten är 3.4 m/s in mot perrongen för utgångsfallet.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
pro(1)	A_p m2	6.00	6.00	6.00	3.00	3.00	3.00	0.30	0.30	0.30
pro(2)	A_N m2	8.04	0.08	0.08	8.04	0.08	0.08	8.04	0.08	0.08
pro(3)	A_S m2	8.04	8.04	0.08	8.04	8.04	0.08	8.04	8.04	0.08
step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(5)	m/s	3.4	4.0	4.8	4.6	5.4	6.5	5.6	6.6	8.2
res(6)	Pa	-14.3	-19.2	-27.3	-15.8	-21.7	-31.6	-18.8	-26.5	-40.4
res(1)	m3/s	42.2	50.6	60.3	44.5	53.7	64.8	48.4	59.4	73.3
res(2)	m3/s	42.2	50.6	60.3	44.5	53.7	64.8	48.4	59.4	73.3
res(3)	m3/s	22.4	0.3	0.4	23.6	0.3	0.4	25.7	0.4	0.5
res(4)	m3/s	-22.4	-0.3	-0.4	-23.6	-0.3	-0.4	-25.7	-0.4	-0.5
res(7)	m3/s	-20.7	-24.0	-28.6	-13.8	-16.1	-19.5	-1.7	-2.0	-2.5
res(8)	m3/s	22.4	26.0	0.4	23.6	27.7	0.4	25.7	30.6	0.5
res(9)	m3/s	-22.4	-26.0	-0.4	-23.6	-27.7	-0.4	-25.7	-30.6	-0.5
res(10)	m3/s	-42.2	-49.0	-60.3	-44.5	-52.1	-64.8	-48.4	-57.6	-73.3
res(11)	m3/s	-42.2	-49.0	-60.3	-44.5	-52.1	-64.8	-48.4	-57.6	-73.3

```

begin
format o 1 q 1
control duct=16 con=1
set 3000m=d,7000,3000,100:qw hvN=t,1.2,AN:qw op=t,0.6
set 20ms=d,7000,20,100 hvS=t,1.2,AS:qw

```



5 Annan utformning

Tryckutjämning sker med fyra tryckutjämningsschakt, två rulltrappssystem och brandgasventilationssystem med ett mindre läckage med stängda spjäll.

En annan utformning är att kombinera tryckutjämningssystem och brandgasventilationssystem till ett enda system för station Triangeln. Nackdelen med ett enda mittplacerat system är att brandgaser från tunnlar måste strömma fram halva perronglängden.

En bättre utformning är två tryckutjämningsschakt i var ände av station Triangeln, vilka samtidigt ersätter brandgasventilationssystemet. Brandgaser från en tunnelbrand kan på detta sätt tas om hand direkt i övergången mellan tunnel och station. Två stora axialfläktar är placerade i var sitt tryckutjämningsschakt svarar för brandgasventilationen och vid normal drift kan fläktbladen tvärställas eller fläkthjulen frirotera.

Utformningen med två kombinerade tryckutjämningsschakt och brandgasventilationssystem kan i princip arbeta på fem olika sätt varav ett driftsätt är en kombination av tre driftsätt. De fyra grundprinciperna är fri tryckutjämning enligt Figur 5.1, brandgasventilation enligt Figur 5.2, brandgaskontroll enligt Figur 5.3 och stationsventilation enligt Figur 5.4.

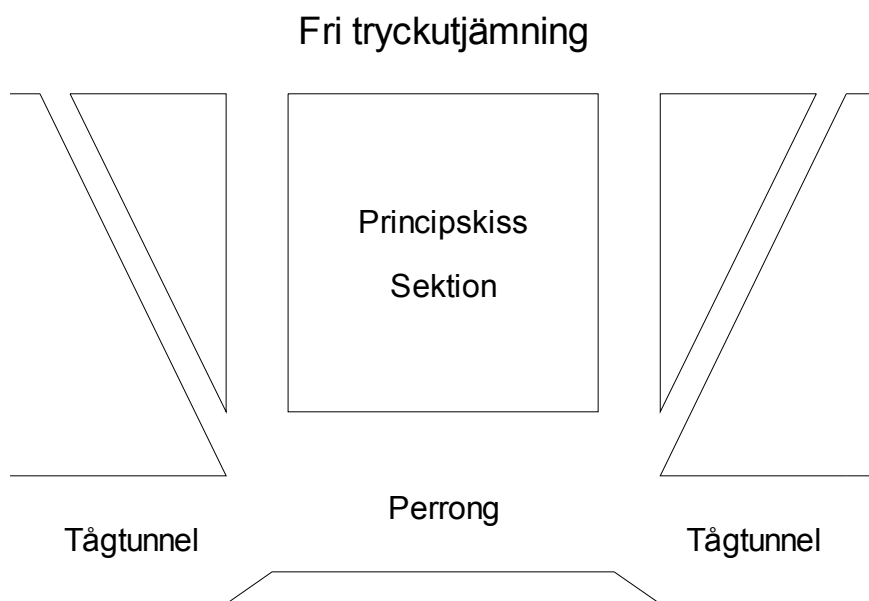
Rulltrappssystemen har ritats förenklat som snedställda schakt i Figur 5.1-4, när de egentligen går ner till perrongen något omslutna för att undvika brandgaslager på högre nivåer.

Det fjärde driftsättet kan också benämnas skyddsventilation. Ett föroreningsutsläpp av något slag kan ventileras bort effektivt. Stationens luftvolym är omkring 60000 m^3 och med halva brandgasventilationsflödet $150 \text{ m}^3/\text{s}$ blir luftomsättningstiden 400 s eller 9 oms/h.

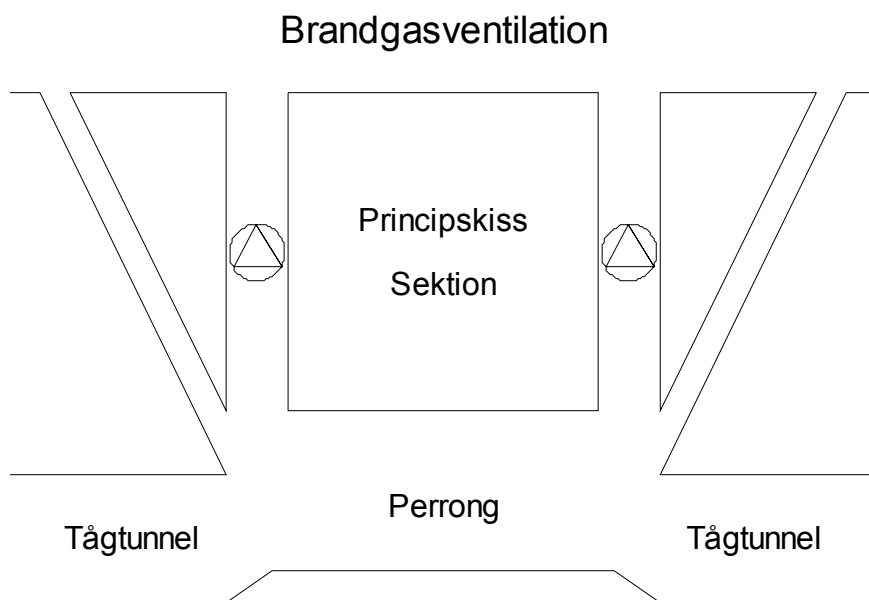
Det femte driftsättet är aktiv tryckutjämning, vilket kan ses som en kombination av passiv tryckutjämning, styrt utflöde från station Triangeln med brandgasventilation och styrt inflöde till station Triangeln med brandgaskontroll. Detta senare driftsätt kommer att undersökas vidare i avsnitt 6.

Hur stora tryckutjämningsschakt som krävs undersöks med tre fall med ett enda tryckutjämningsschakt med diametrarna 6400, 8000 respektive 9600 mm och två fall med två tryckutjämningsschakt med diametrarna 4800 respektive 6400 mm.

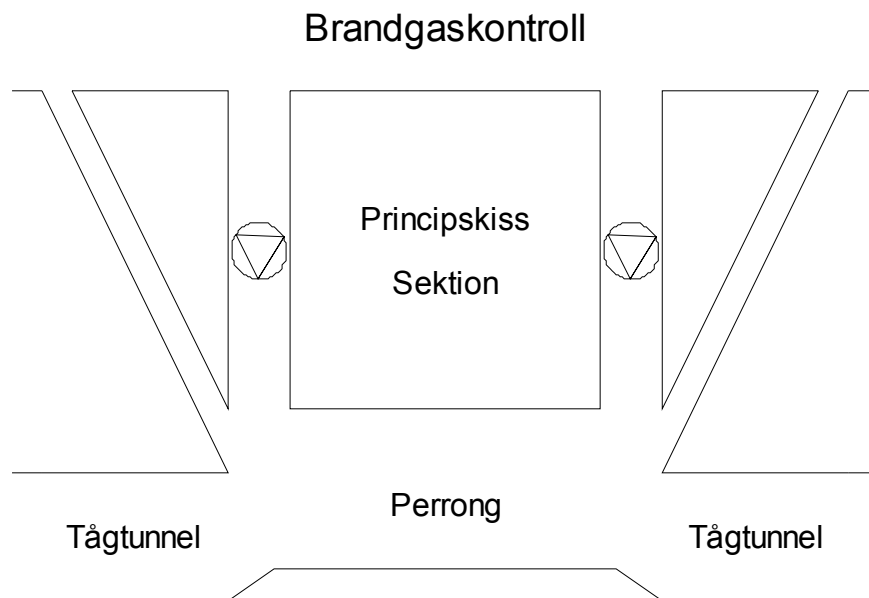
En viktig anmärkning är att samtliga tryckutjämningsschakt har en friktionsförlust för 15 m och en engångsförlust lika med två dynamiska tryck. Fri utströmning utan någon diffusor ger alltid en förlust lika ett dynamiskt tryck. Den fria arean i tryckutjämningsschaktens gallerhuvar bör vara större än själva schaktets fria area. Tryckförlusten för friktion är liten, eftersom schaktet endast är några diametrar långt. Friktionsförlusten är lika stor som det dynamiska trycket efter omkring fyrtio diametrar. Det går egentligen inte att tala om fullt utbildad strömning i tryckutjämningsschakten. Något som underlättar inströmningen i tryckutjämningsschakten är att övergångarna är väl avrundade.



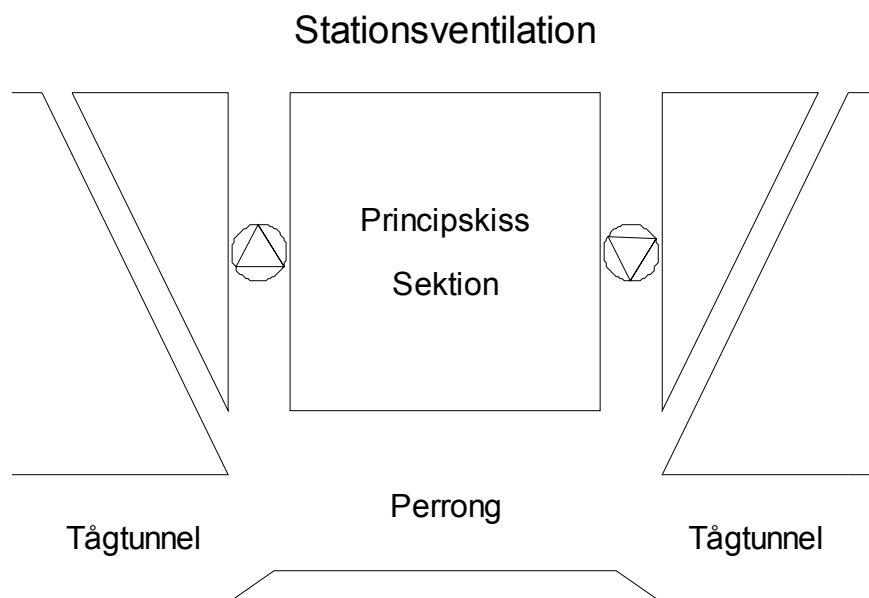
Figur 5.1 Princip för fri tryckutjämning med två tryckutjämningschakt.



Figur 5.2 Princip för brandgasventilation med två tryckutjämningschakt.



Figur 5.3 Princip för brandgaskontroll med två tryckutjämningschakt.



Figur 5.4 Princip för stationsventilation med två tryckutjämningschakt.

Ett tryckutjämningschakt med diameter 6400 mm

De fyra tryckutjämningschakten med diametern 3200 mm anslutna till de fyra anslutande tågtunnlarna ersätts med ett enda tryckutjämningschakt med diametern 6400 mm anslutet till själva stationshallen. Detta enda schakt har samma tvärsnittsarea som de fyra tryckutjämningschakten och samma engångsförlust lika med två dynamiska tryck.

Lufthastigheten för värsta tågfall 4 och 6 minskar något till 14.0 m/s jämfört med 15.1 m/s respektive 15.0 m/s. Skillnaden beror på in- och utströmning i de fyra tryckutjämningschakten har inte försumbara tryckfall, vilket med ett högre strömningsmotstånd minskar tryckutjämningschaktet och därmed ökar lufthastigheten i andra öppningar.

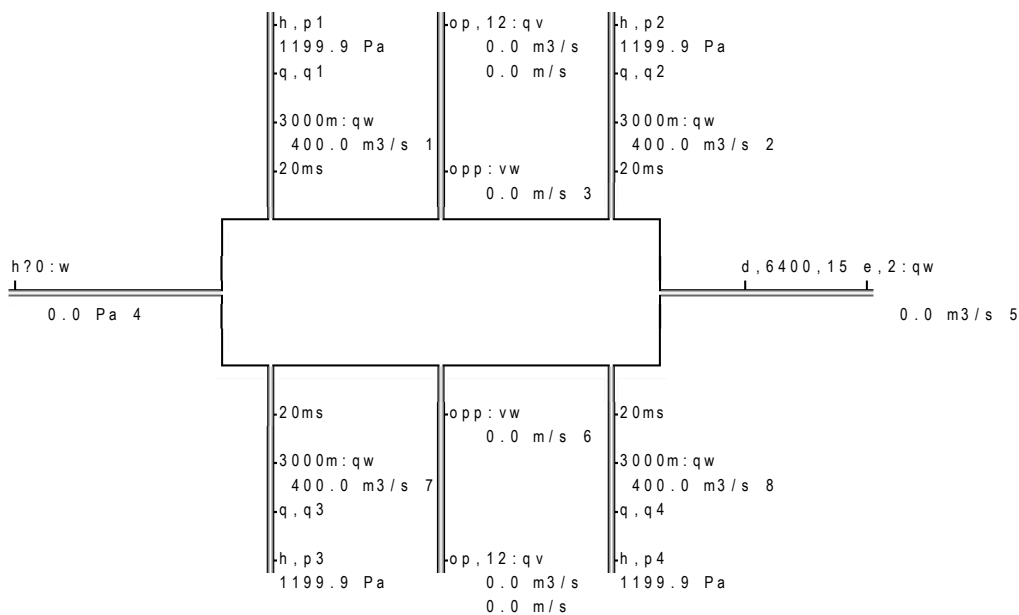
Tryckskillnaden mellan station Triangeln och omgivningen är 147 Pa jämfört med utgångsfallets 170 Pa för fall 4.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res (3)	m/s	0.0	6.0	6.0	14.0	0.0	14.0	8.5	8.5	0.0
res (4)	Pa	0.0	26.7	-26.7	147.4	0.0	-147.4	54.2	-54.2	0.0
res (1)	m3/s	0.0	400.0	59.6	400.0	400.0	140.1	400.0	400.0	400.0
res (2)	m3/s	0.0	-59.6	59.6	400.0	0.0	140.1	400.0	84.9	400.0
res (5)	m3/s	0.0	149.6	-149.6	351.5	0.0	-351.5	213.1	-213.1	0.0
res (6)	m/s	0.0	6.0	6.0	14.0	0.0	14.0	8.5	8.5	0.0
res (7)	m3/s	0.0	59.6	-59.6	140.1	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0
res (8)	m3/s	0.0	59.6	400.0	140.1	0.0	400.0	84.9	400.0	400.0

```

begin
format o 1 q 1
control duct=16 k=100 con=1 trix=1
set 3000m=d,7000,3000,100 20ms=d,7000,20,100
set op=t,0.6 opp=op,6 es=e,0

```



Ett tryckutjämningschakt med diameter 8000 mm

Ett enda tryckutjämningschakt med diametern 8000 mm anslutet till stationshallen testas. Tvärsnittsarean för tryckutjämningssystemet ökar en faktor 1.575 (1.25^2) mot fallet med diameter 6400 mm. Den ökade tvärsnittsarea förbättrar tryckutjämnningen något. Lufthastigheten för värsta tågfall 4 och 6 är 11.2 m/s i båda fallen, vilket är viss förbättring mot diameter 6400 mm och 14.0 m/s.

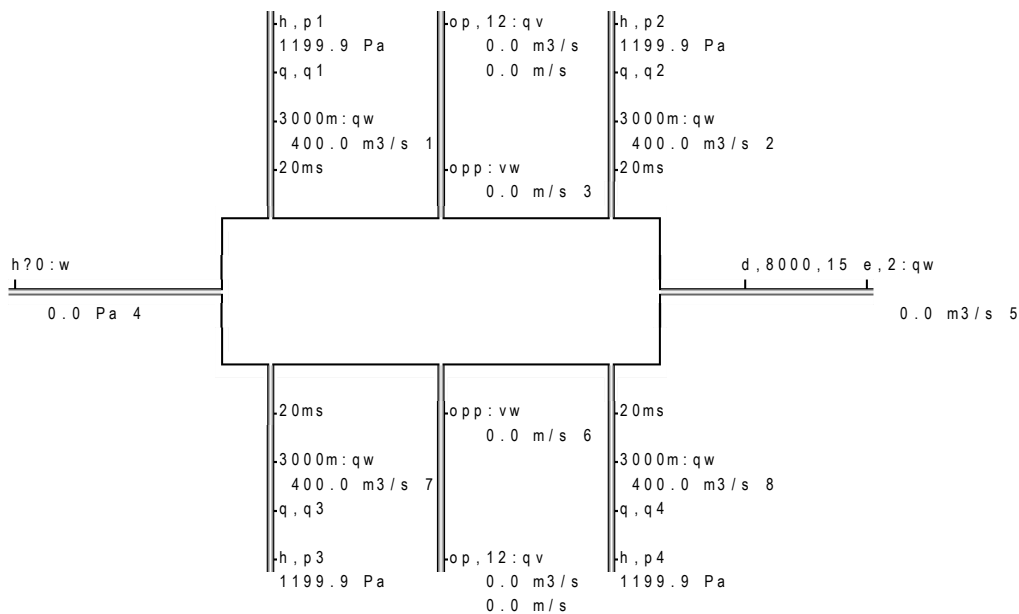
Tryckskillnaden mellan station Triangeln och omgivningen ovan mark är 94 Pa, vilket är något lägre än 147 Pa för fallet med diametern 6400 mm.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(3)	m/s	0.0	4.9	4.9	11.2	0.0	11.2	6.5	6.5	0.0
res(4)	Pa	0.0	18.2	-18.2	94.4	0.0	-94.4	31.9	-31.9	0.0
res(1)	m3/s	0.0	400.0	49.2	400.0	400.0	112.2	400.0	400.0	400.0
res(2)	m3/s	0.0	-49.2	49.2	400.0	0.0	112.2	400.0	65.2	400.0
res(5)	m3/s	0.0	193.5	-193.5	441.1	0.0	-441.1	256.5	-256.5	0.0
res(6)	m/s	0.0	4.9	4.9	11.2	0.0	11.2	6.5	6.5	0.0
res(7)	m3/s	0.0	49.2	-49.2	112.2	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0
res(8)	m3/s	0.0	49.2	400.0	112.2	0.0	400.0	65.2	400.0	400.0

```

begin
format o 1 q 1
control duct=16 k=100 con=1 trix=1
set 3000m=d,7000,3000,100 20ms=d,7000,20,100
set op=t,0.6 opp=op,6 es=e,0

```



Ett tryckutjämningschakt med diameter 9600 mm

Ett enda tryckutjämningschakt med diametern 8000 mm anslutet till stationshallen testas. Tvärsnittsarean för tryckutjämningssystemet ökar en faktor 2.25 (1.5^2) mot fallet med diameter 6400 mm. Den ökade tvärsnittsarea förbättrar tryckutjämnningen något. Lufthastigheten för värsta tågfall 4 och 6 är 9.0 m/s i båda fallen, vilket är viss förbättring mot diameter 6400 mm och 14.0 m/s.

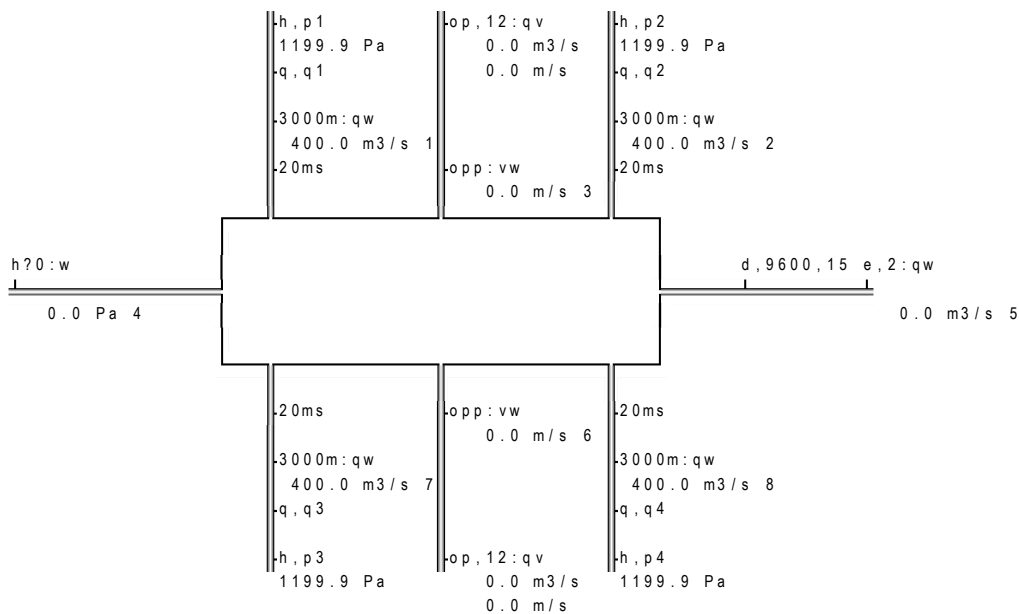
Tryckskillnaden mellan station Triangeln och omgivningen ovan mark är 61 Pa, vilket är betydligt lägre än 147 Pa för fallet med diametern 6400 mm.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(3)	m/s	0.0	4.1	4.1	9.0	0.0	9.0	5.1	5.1	0.0
res(4)	Pa	0.0	12.3	-12.3	61.0	0.0	-61.0	19.4	-19.4	0.0
res(1)	m3/s	0.0	400.0	40.5	400.0	400.0	90.1	400.0	400.0	400.0
res(2)	m3/s	0.0	-40.5	40.5	400.0	0.0	90.1	400.0	50.8	400.0
res(5)	m3/s	0.0	229.9	-229.9	511.6	0.0	-511.6	288.3	-288.3	0.0
res(6)	m/s	0.0	4.1	4.1	9.0	0.0	9.0	5.1	5.1	0.0
res(7)	m3/s	0.0	40.5	-40.5	90.1	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0
res(8)	m3/s	0.0	40.5	400.0	90.1	0.0	400.0	50.8	400.0	400.0

```

begin
format o 1 q 1
control duct=16 k=100 con=1 trix=1
set 3000m=d,7000,3000,100 20ms=d,7000,20,100
set op=t,0.6 opp=op,6 es=e,0

```



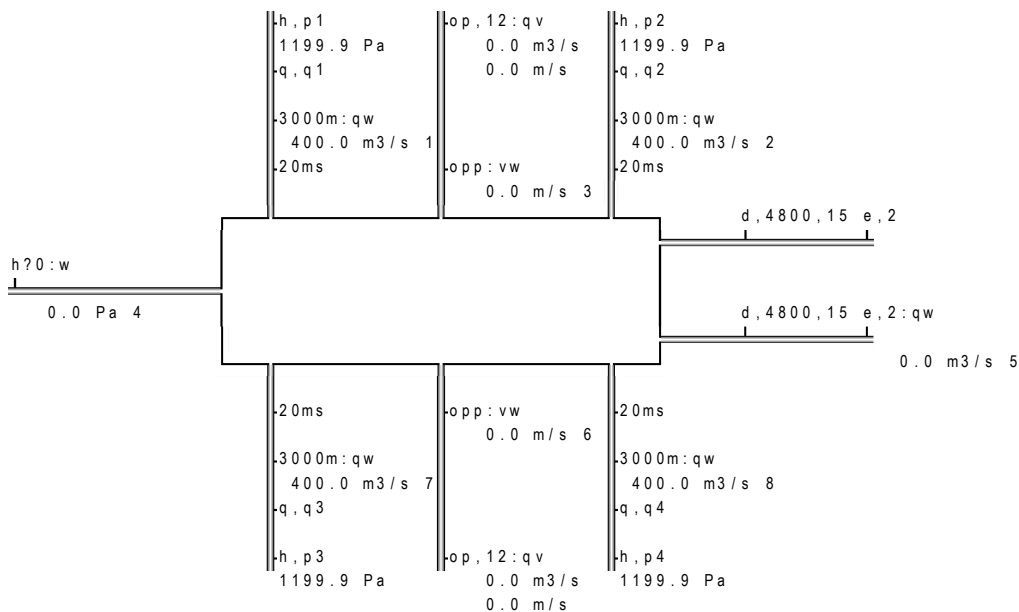
Två tryckutjämningschakt med diameter 4800 mm

Två tryckutjämningschakt med diametern 4800 mm placerade i var sin ände av station Triangeln testas här. Tvärsnittarean för de två schakten för håller sig till de fyra ursprungliga schakten som 9:8 ($2 \cdot 4.8^2 : 4 \cdot 3.2^2$), vilket skall minska lufthastigheten i öppningar något. Resultatet blir för tågfall 4 och 6 13.3 m/s mot tidigare 15.1 respektive 15.0 m/s.

Tryckskillnaden mellan station Triangeln och omgivningen ovan mark är 133 Pa, vilket är något lägre än 147 Pa för fallet med diametern 6400 mm.

step	number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(3)	m/s	0.0	5.7	5.7	13.3	0.0	13.3	8.0	8.0	0.0
res(4)	Pa	0.0	24.5	-24.5	133.2	0.0	-133.2	47.9	-47.9	0.0
res(1)	m3/s	0.0	400.0	57.1	400.0	400.0	133.2	400.0	400.0	400.0
res(2)	m3/s	0.0	-57.1	57.1	400.0	0.0	133.2	400.0	79.9	400.0
res(5)	m3/s	0.0	80.1	-80.1	186.8	0.0	-186.8	112.1	-112.1	0.0
res(6)	m/s	0.0	5.7	5.7	13.3	0.0	13.3	8.0	8.0	0.0
res(7)	m3/s	0.0	57.1	-57.1	133.2	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0
res(8)	m3/s	0.0	57.1	400.0	133.2	0.0	400.0	79.9	400.0	400.0

```
begin
format      o 1 q 1
control     duct=16  k=100  con=1      trix=1
set         3000ms=d,7000,3000,100    20ms=d,7000,20,100
set         op=t,0.6                    opp=op,6                es=e,0
```



Två tryckutjämningsschakt med diameter 6400 mm

Två tryckutjämningsschakt med diametern 6400 mm placerade i var sin ände av station Triangeln testas här. Tvärsnittarean för de två schakten för håller sig till de fyra ursprungliga schakten som 2:1 ($2 \cdot 6.4^2 : 4 \cdot 3.2^2$), vilket skall minska lufthastigheten i öppningar betydligt. Resultatet blir för tågfall 4 och 6 9.7 m/s mot tidigare 15.1 respektive 15.0 m/s för utgångsfallet.

Två tryckutjämningsschakt halverar inte lufthastigheten i öppningar mot perrongen 9.7 m/s mot endast ett utjämningsschakt med lufthastigheten 14.0 m/s. Det krävs en fyrdubbling av den totala tvärsnittsarean för alla tryckavlastande strömningsvägar.

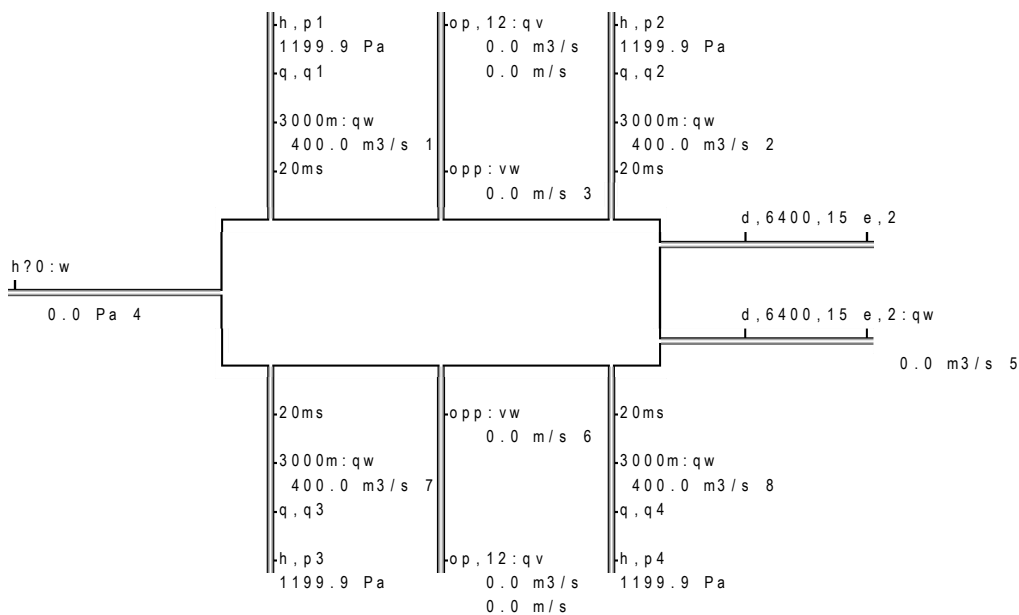
Tryckskillnaden mellan station Triangeln och omgivningen ovan mark är 71 Pa, vilket är betydligt lägre än 147 Pa för fallet med ett lika stort schakt.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(3)	m/s	0.0	4.3	4.3	9.7	0.0	9.7	5.5	5.5	0.0
res(4)	Pa	0.0	14.1	-14.1	71.1	0.0	-71.1	23.1	-23.1	0.0
res(1)	m3/s	0.0	400.0	43.4	400.0	400.0	97.4	400.0	400.0	400.0
res(2)	m3/s	0.0	-43.4	43.4	400.0	0.0	97.4	400.0	55.4	400.0
res(5)	m3/s	0.0	108.9	-108.9	244.2	0.0	-244.2	139.0	-139.0	0.0
res(6)	m/s	0.0	4.3	4.3	9.7	0.0	9.7	5.5	5.5	0.0
res(7)	m3/s	0.0	43.4	-43.4	97.4	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0
res(8)	m3/s	0.0	43.4	400.0	97.4	0.0	400.0	55.4	400.0	400.0

```

begin
format o 1 q 1
control duct=16 k=100 con=1 trix=1
set 3000m=d,7000,3000,100 20ms=d,7000,20,100
set op=t,0.6 opp=op,6 es=e,0

```

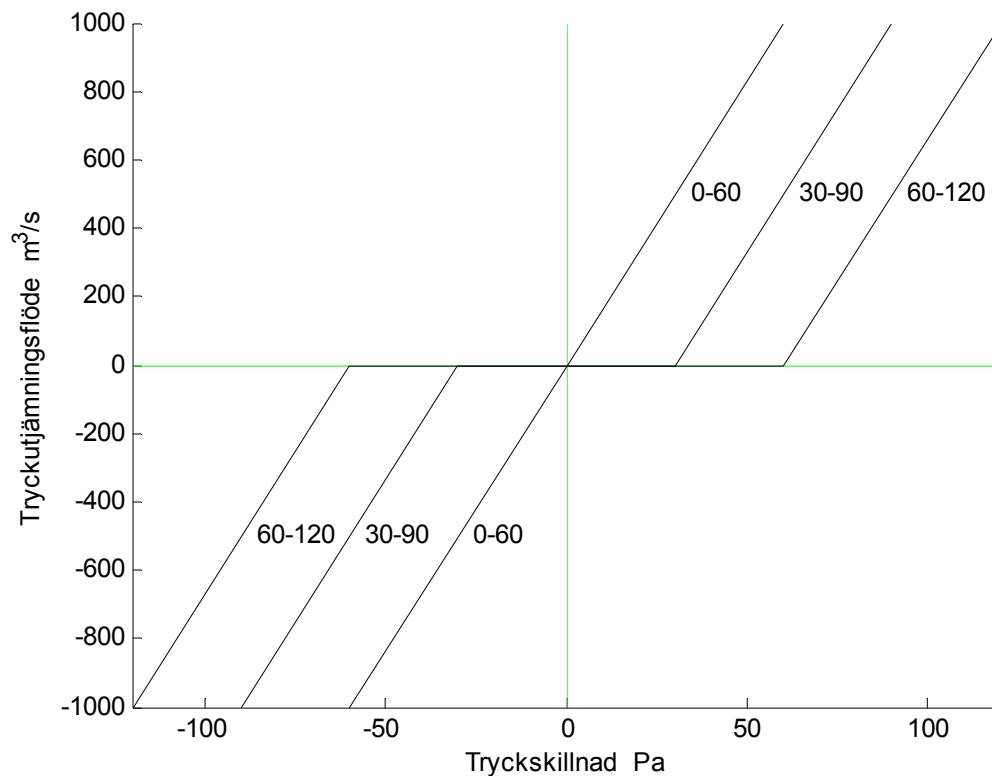


6 Aktiv tryckutjämning

I detta avsnitt undersöks vilka tryckutjämningsflöden som krävs för att uppfylla vissa krav. En enkel uppskattning är att det aktiva tryckutjämningsflödet måste vara lika med summaflödet för tågrörelserna. Detta ger för de nio tågrörelsefallen 0, -400, 400, -800, 0, 800, -400, 400 och 0 m³/s. Dessa störflöden är betydligt större än brandgasventilationsflödet om 300 m³/s. Dessa siffror visar att metoden med aktiv tryckutjämning är tveksam.

Utgångsfallet med de nio tågfallen testas med konstant undertryck 30 Pa, konstant nolltryck 0 Pa och konstant övertryck 30 Pa. Trycket avser perrongen relativt omgivningen.

Utgångsfallet med de nio tågfallen testas också med ett tryckutjämningsflöde som en funktion av tryckskillnaden mellan perrong och omgivning enligt Figur 6.1.



Figur 6.1 Tre funktioner för aktiv tryckutjämning.

Sättet att skatta tryckutjämningsflödet som summan av tågens störflöden testas till hälften i ett fall, benämnt halva tågflödet, och helt i ett annat fall, benämnt hela tågflödet.

Tryckutjämning till 30 Pa övertryck

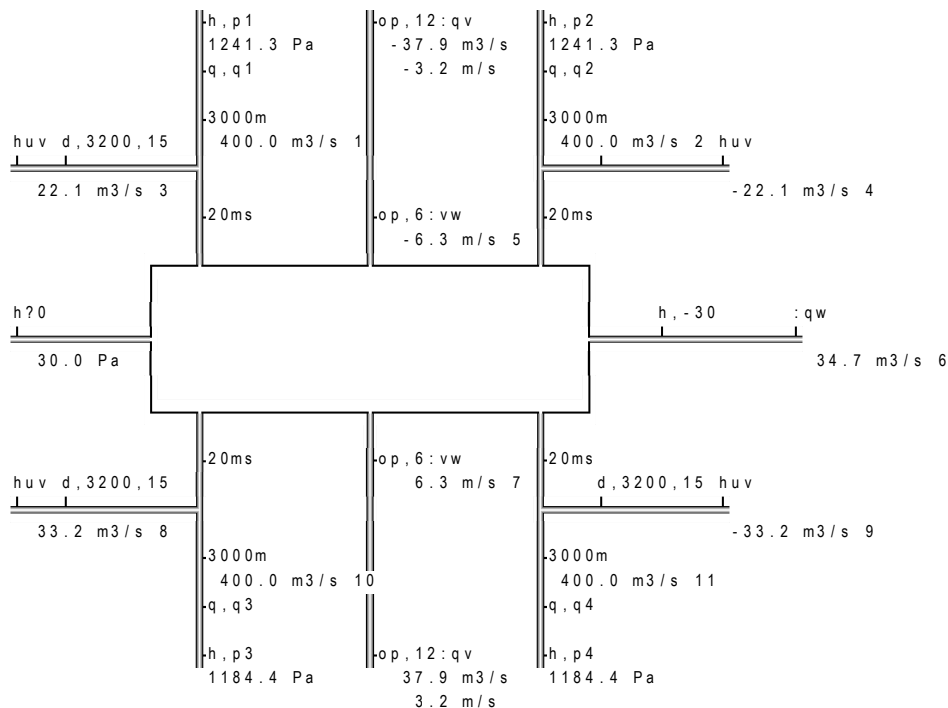
Aktiv tryckutjämning med 30 Pa övertryck innebär att lufthastigheten alltid är 5 m/s upp genom rulltrappssystemen från perrongen, om det finns två strypningar med samma area. Tryckskillnaden 30 Pa delas lika mellan två öppningar. Lufthastigheten 5 m/s motsvarar ett dynamiskt tryck om 15 Pa. Syfte är att undersöka hur stora flöden som måste tillföras eller bortföras för att visa vad som krävs för aktiv tryckutjämning.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(5)	m/s	-6.3	-6.3	-6.3	-6.3	-6.3	-6.3	-6.3	-6.3	-6.3
res(6)	m ³ /s	-465.4	54.0	-734.8	573.4	-215.4	-1004	304.1	-484.7	34.7
res(7)	m/s	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
res(1)	m ³ /s	-62.6	400.0	-62.6	400.0	400.0	-62.6	400.0	-62.6	400.0
res(2)	m ³ /s	-62.6	-62.6	-62.6	400.0	-62.6	-62.6	400.0	400.0	400.0
res(3)	m ³ /s	-34.8	22.1	-34.8	22.1	22.1	-34.8	22.1	-34.8	22.1
res(4)	m ³ /s	34.8	34.8	34.8	-22.1	34.8	34.8	-22.1	-22.1	-22.1
res(8)	m ³ /s	-34.8	-34.8	-34.8	-34.8	-34.8	33.2	-34.8	33.2	33.2
res(9)	m ³ /s	34.8	34.8	-33.2	34.8	-33.2	-33.2	-33.2	-33.2	-33.2
res(10)	m ³ /s	62.6	62.6	62.6	62.6	62.6	400.0	62.6	400.0	400.0
res(11)	m ³ /s	62.6	62.6	400.0	62.6	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format    o 1 q 1
control   duct=16 con=1 trix=1
set       3000m=d,7000,3000,100:qw
set       20ms=d,7000,20,100 op=t,0.6 huv=e,2:qw

```



Tryckutjämning till nolltryck

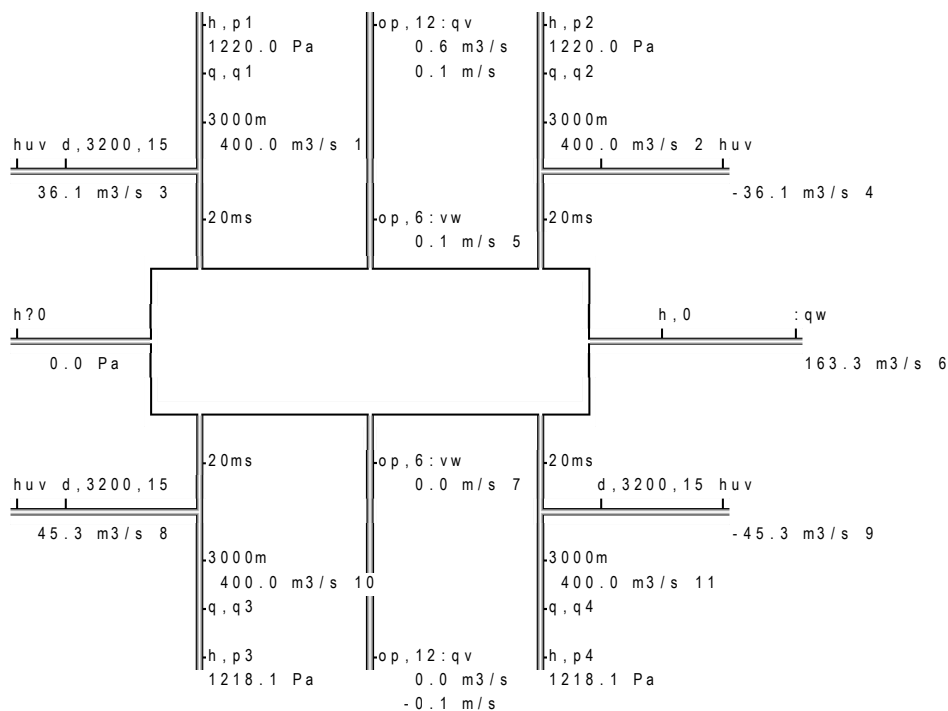
Aktiv tryckutjämning till nolltryck innebär att luft hastigheten alltid är 0 m/s mellan perrong och omgivning. Detta fall innebär att alla annan naturlig tryckutjämning inte utnyttjas. Syfte är att undersöka hur stora flöden som måste tillföras eller bortföras för att visa vad som krävs för aktiv tryckutjämning.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(5)	m/s	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
res(6)	m ³ /s	0.0	435.6	-354.2	871.1	81.6	-709.1	517.0	-272.5	163.3
res(7)	m/s	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
res(1)	m ³ /s	0.0	400.0	0.4	400.0	400.0	0.4	400.0	0.6	400.0
res(2)	m ³ /s	0.0	0.0	0.0	400.0	0.0	0.0	400.0	400.0	400.0
res(3)	m ³ /s	0.0	36.1	0.0	36.1	36.1	0.0	36.1	0.1	36.1
res(4)	m ³ /s	0.0	0.0	0.0	-36.1	0.0	0.0	-36.1	-36.1	-36.1
res(8)	m ³ /s	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	45.3	0.0	45.3	45.3
res(9)	m ³ /s	0.0	0.0	-45.3	0.0	-45.3	-45.3	-45.3	-45.3	-45.3
res(10)	m ³ /s	0.0	0.1	0.0	0.4	0.0	400.0	0.3	400.0	400.0
res(11)	m ³ /s	0.0	0.1	400.0	0.4	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format o 1 q 1
control duct=16 con=1 trix=1
set 3000m=d,7000,3000,100:qw
set 20ms=d,7000,20,100 op=t,0.6 huv=e,2:qw

```



Tryckutjämningsfunktion 0-60 Pa vid 0-1000 m³/s

Rubriken anger att sambandet mellan tryckskillnad och aktivt tryckutjämningsflöde. Själva funktionen finns återgiven i Figur 6.1 tillsammans med två andra funktioner. Det finns ingen dödzon utan det finns alltid ett unikt tryckutjämningsflöde för varje tryckskillnad.

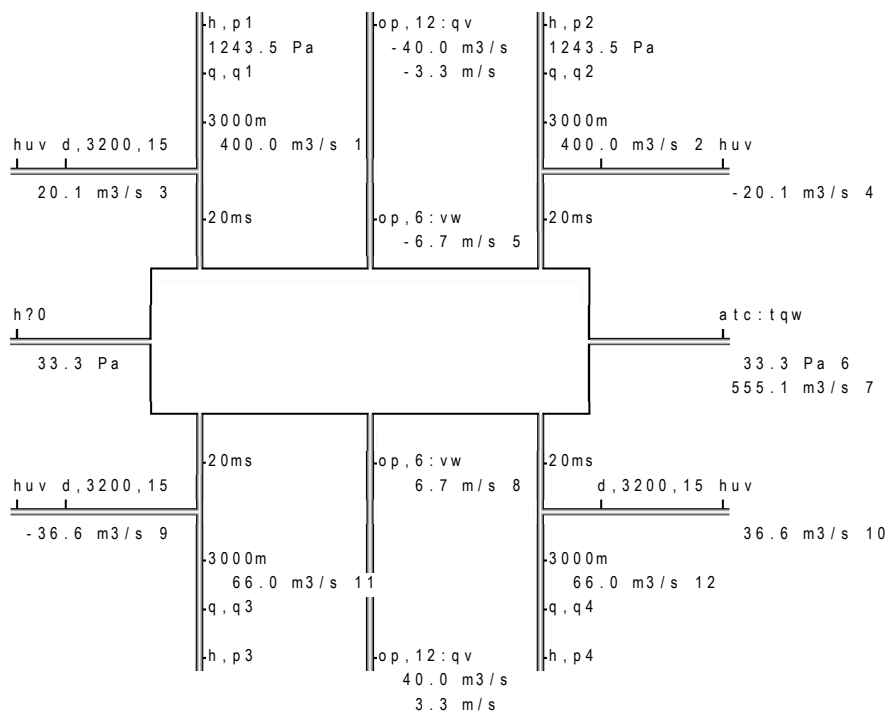
Resultatet nedan visar att lufthastigheten i perrongdörrar minskas betydlig jämfört med utgångsfallet, men tryckutjämningsflödena är stora.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(7)	m ³ /s	0.0	198.9	-153.7	555.1	22.7	-444.5	347.0	-165.5	115.8
res(6)	Pa	0.0	11.9	-9.2	33.3	1.4	-26.7	20.8	-9.9	6.9
res(5)	m/s	0.0	-4.0	3.5	-6.7	-1.3	6.0	-5.3	3.6	-3.0
res(8)	m/s	0.0	4.0	-3.5	6.7	1.3	-6.0	5.3	-3.6	3.0
res(1)	m ³ /s	0.0	400.0	34.0	400.0	400.0	57.8	400.0	35.2	400.0
res(2)	m ³ /s	0.0	-39.5	34.0	400.0	-13.3	57.8	400.0	400.0	400.0
res(3)	m ³ /s	0.0	31.0	18.0	20.1	35.5	30.7	26.9	18.7	33.2
res(4)	m ³ /s	0.0	21.9	-18.0	-20.1	7.4	-30.7	-26.9	-39.9	-33.2
res(9)	m ³ /s	0.0	-21.9	18.0	-36.6	-7.4	53.5	-29.0	48.5	43.0
res(10)	m ³ /s	0.0	21.9	-48.2	36.6	-44.8	-53.5	-37.6	-48.5	-43.0
res(11)	m ³ /s	0.0	39.5	-34.0	66.0	13.3	400.0	52.2	400.0	400.0
res(12)	m ³ /s	0.0	39.5	400.0	66.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format   o 1 q 1
control  duct=16 con=1 trix=1
segment  atc 60:-1000 -60:1000
set       3000m=d,7000,3000,100:qw
set       20ms=d,7000,20,100 op=t,0.6 huv=e,2:qw

```



Tryckutjämningsfunktion 30-90 Pa vid 0-1000 m³/s

Rubriken anger att sambandet mellan tryckskillnad och aktivt tryckutjämningsflöde. Själva funktionen finns återgiven i Figur 6.1 tillsammans med två andra funktioner. Det finns en dödzon på (-30,30) Pa för vilket tryckutjämningsflödet är noll.

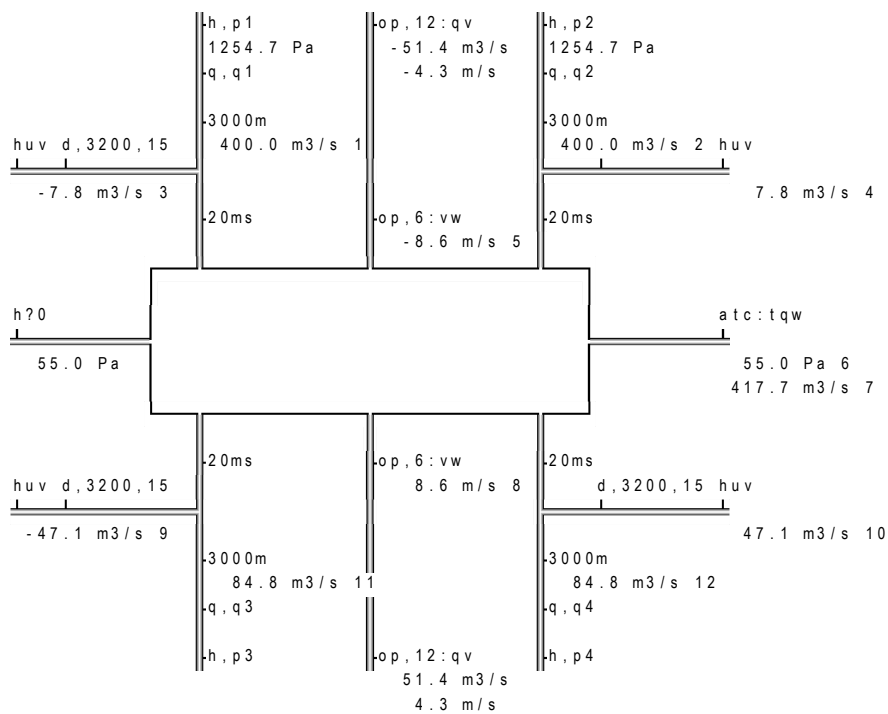
Resultatet nedan visar att lufthastigheten i perrongdörrar ökar något jämfört med fallet utan dödzon, men tryckutjämningsflödena är något mindre.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(7)	m ³ /s	0.0	39.0	-0.9	417.7	0.1	-338.7	240.2	-61.3	29.0
res(6)	Pa	0.0	32.3	-28.0	55.0	2.6	-50.3	44.4	-33.6	31.7
res(5)	m/s	0.0	-6.6	6.1	-8.6	-1.9	8.2	-7.7	6.7	-6.5
res(8)	m/s	0.0	6.6	-6.1	8.6	1.9	-8.2	7.7	-6.7	6.5
res(1)	m ³ /s	0.0	400.0	59.2	400.0	400.0	79.3	400.0	64.9	400.0
res(2)	m ³ /s	0.0	-64.9	59.2	400.0	-18.3	79.3	400.0	400.0	400.0
res(3)	m ³ /s	0.0	20.8	31.4	-7.8	35.0	42.1	12.7	34.4	21.1
res(4)	m ³ /s	0.0	36.1	-31.4	7.8	10.2	-42.1	-12.7	-48.0	-21.1
res(9)	m ³ /s	0.0	-36.1	31.4	-47.1	-10.2	60.0	-42.3	55.5	32.4
res(10)	m ³ /s	0.0	36.1	-53.9	47.1	-44.4	-60.0	-25.4	-55.5	-32.4
res(11)	m ³ /s	0.0	64.9	-59.2	84.8	18.3	400.0	76.1	400.0	400.0
res(12)	m ³ /s	0.0	64.9	400.0	84.8	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format o 1 q 1
control duct=16 con=1 trix=1
segment atc 90:-1000 30:-1 -30:1 -90:1000
set 3000m=d,7000,3000,100:qw
set 20ms=d,7000,20,100 op=t,0.6 huv=e,2:qw

```



Tryckutjämningsfunktion 60-120 Pa vid 0-1000 m³/s

Rubriken anger att sambandet mellan tryckskillnad och aktivt tryckutjämningsflöde. Själva funktionen finns återgiven i Figur 6.1 tillsammans med två andra funktioner. Det finns en dödzon på (-60,60) Pa för vilket tryckutjämningsflödet är noll.

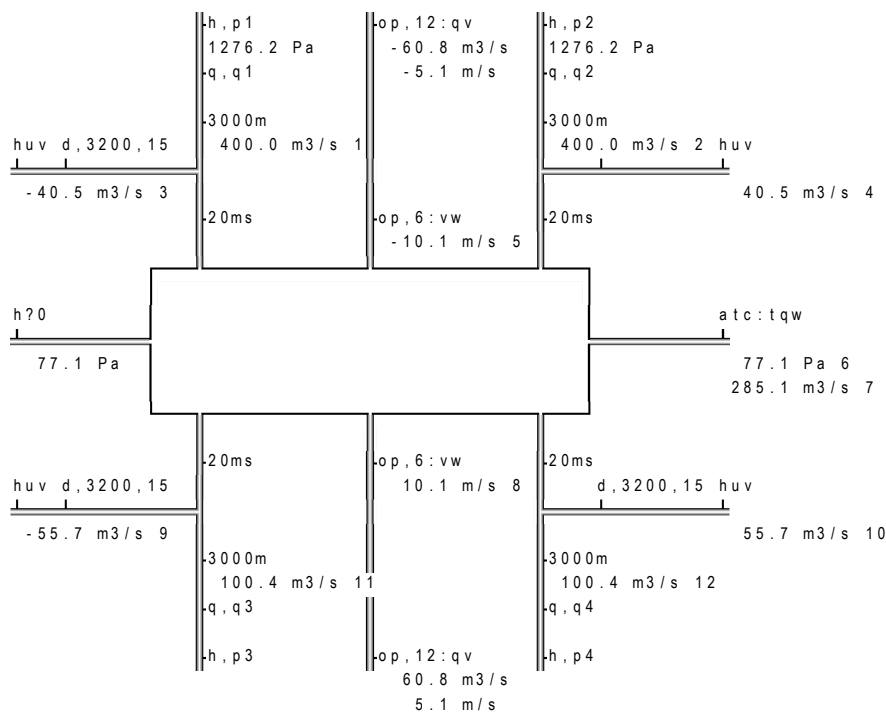
Resultatet nedan visar att lufthastigheten i perrongdörrar ökar något jämfört med fallet med mindre dödzon, men tryckutjämningsflödena är betydligt mindre.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(7)	m ³ /s	0.0	0.6	-0.5	285.1	0.0	-250.6	91.7	-0.9	0.7
res(6)	Pa	0.0	38.4	-28.1	77.1	2.6	-75.0	65.4	-52.3	39.8
res(5)	m/s	0.0	-7.2	6.1	-10.1	-1.9	10.0	-9.3	8.4	-7.3
res(8)	m/s	0.0	7.2	-6.1	10.1	1.9	-10.0	9.3	-8.4	7.3
res(1)	m ³ /s	0.0	400.0	59.3	400.0	400.0	96.9	400.0	81.0	400.0
res(2)	m ³ /s	0.0	-70.8	59.3	400.0	-18.4	96.9	400.0	400.0	400.0
res(3)	m ³ /s	0.0	17.0	31.5	-40.5	35.0	51.4	-30.9	43.0	16.0
res(4)	m ³ /s	0.0	39.3	-31.5	40.5	10.2	-51.4	30.9	-53.8	-16.0
res(9)	m ³ /s	0.0	-39.3	31.5	-55.7	-10.2	66.3	-51.4	60.6	28.1
res(10)	m ³ /s	0.0	39.3	-53.9	55.7	-44.4	-66.3	-9.5	-60.6	-28.1
res(11)	m ³ /s	0.0	70.8	-59.3	100.4	18.4	400.0	92.5	400.0	400.0
res(12)	m ³ /s	0.0	70.8	400.0	100.4	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format   o 1 q 1
control  duct=16 con=1 trix=1
segment  atc 120:-1000 60:-1 -60:1 -120:1000
set      3000m=d,7000,3000,100:qw
set      20ms=d,7000,20,100 op=t,0.6 huv=e,2:qw

```



Tryckutjämning med halva tågflödet

Ett sätt att tryckutjämna kan vara att beräkna flödesobalansen för alla tågrörelser och motverka denna obalans med ett aktivt flöde. Resultatet redovisas här för en kompensering av halva flödesobalansen. Motflödena blir därför 0 m³/s för tågfall 1-5-9, 200 m³/s för tågfall 2-3-7-8 och 400 m³/s för tågfall 4-6. Det ideala motflödet ges av flöden för fallet med aktiv tryckutjämning med nolltryck (se sida 35), vilka är 0, 82 och 163 m³/s för tågfall 1-5-9, 436, 354, 517 och 273 m³/s för tågfall 2-3-7-8 och 871 och 709 m³/s för tågfall 4-6.

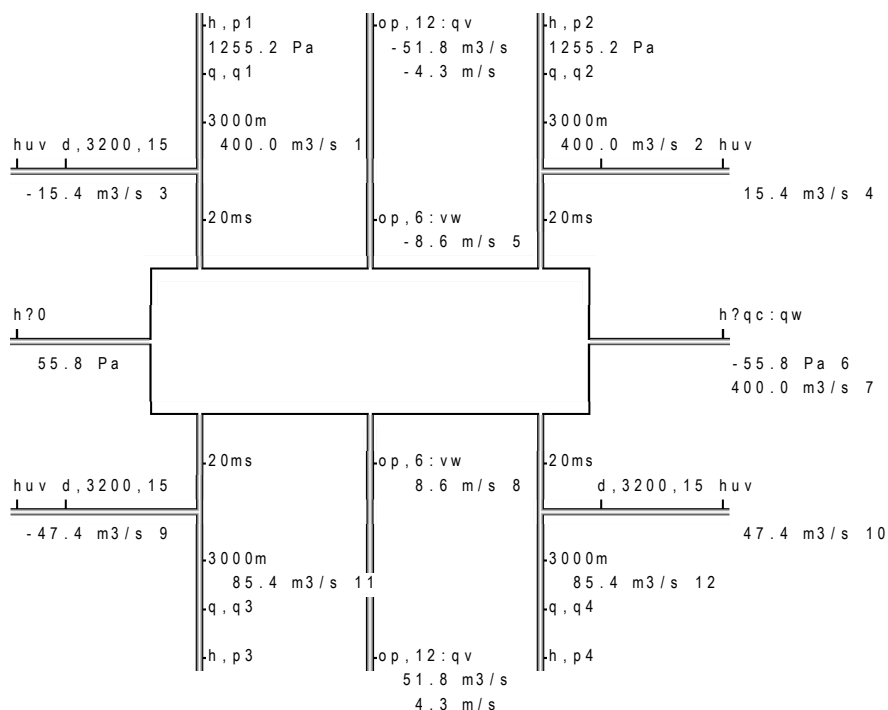
Lufthastigheten i perrongdörrarna för utgångsfallet är högst för fall 4, 7, 9 och 6 med siffervärdena 8.6, 8.4, 7.3 respektive 6.9 m/s. Detta är delvis en minskning mot utgångsfallet.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(6)	Pa	0.0	-11.8	5.5	-55.8	-2.6	35.8	-52.9	4.9	-40.0
res(7)	m ³ /s	0.0	200.0	-200.0	400.0	0.0	-400.0	200.0	-200.0	0.0
res(5)	m/s	0.0	-4.0	2.7	-8.6	-1.9	6.9	-8.4	2.5	-7.3
res(8)	m/s	0.0	4.0	-2.7	8.6	1.9	-6.9	8.4	-2.5	7.3
res(1)	m ³ /s	0.0	400.0	26.2	400.0	400.0	66.9	400.0	24.6	400.0
res(2)	m ³ /s	0.0	-39.3	26.2	400.0	-18.4	66.9	400.0	400.0	400.0
res(3)	m ³ /s	0.0	31.1	13.9	-15.4	35.0	35.5	5.1	13.1	15.9
res(4)	m ³ /s	0.0	21.8	-13.9	15.4	10.2	-35.5	-5.1	-38.0	-15.9
res(9)	m ³ /s	0.0	-21.8	13.9	-47.4	-10.2	56.1	-46.2	46.9	27.9
res(10)	m ³ /s	0.0	21.8	-47.1	47.4	-44.4	-56.1	-19.9	-46.9	-27.9
res(11)	m ³ /s	0.0	39.3	-26.2	85.4	18.4	400.0	83.1	400.0	400.0
res(12)	m ³ /s	0.0	39.3	400.0	85.4	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format o 1 q 1
control duct=16 con=1 trix=1
set 3000m=d,7000,3000,100:qw
set 20ms=d,7000,20,100 op=t,0.6 huv=e,2:qw

```



Tryckutjämning med hela tågflödet

Ett sätt att tryckutjämna kan vara att beräkna flödesobalansen för alla tågrörelser och motverka denna obalans med ett aktivt flöde. Resultatet redovisas här för en kompensering av hela flödesobalansen. Motflödena blir därför 0 m³/s för tågfall 1-5-9, 400 m³/s för tågfall 2-3-7-8 och 800 m³/s för tågfall 4-6.

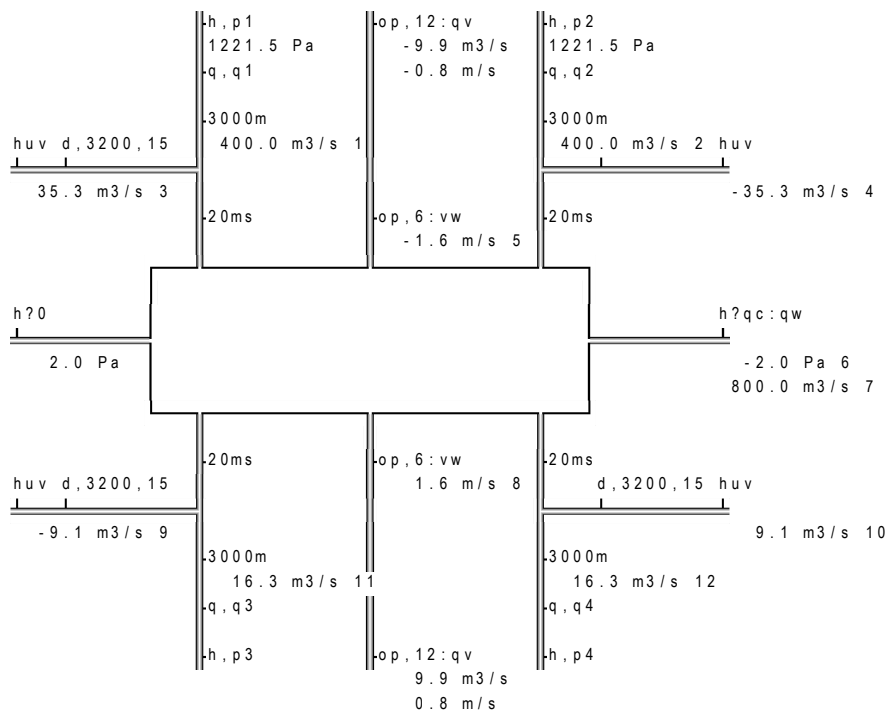
Lufthastigheten i perrongdörrarna för utgångsfallet är högst för fall 9, 7, 8 och 6 med siffervärdena 7.3, 4.1, 3.8 respektive 1.9 m/s. Detta är en betydlig minskning mot utgångsfallets värden. En konstighet är fall 9 med den högsta lufthastigheten och förklaringen är tryckfall där tryckutjämningschakt ansluter till en tågtunnel. Om dessa tryckfall slopas blir lufthastigheten lägre än 1 m/s för samtliga nio tågfall.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(6)	Pa	0.0	-0.3	-0.5	-2.0	-2.6	-3.2	-10.9	-12.7	-40.0
res(7)	m ³ /s	0.0	400.0	-400.0	800.0	0.0	-800.0	400.0	-400.0	0.0
res(5)	m/s	0.0	-0.6	-0.8	-1.6	-1.9	-2.1	-3.8	-4.1	-7.3
res(8)	m/s	0.0	0.6	0.8	1.6	1.9	2.1	3.8	4.1	7.3
res(1)	m ³ /s	0.0	400.0	-7.7	400.0	400.0	-20.4	400.0	-40.7	400.0
res(2)	m ³ /s	0.0	-6.1	-7.7	400.0	-18.4	-20.4	400.0	400.0	400.0
res(3)	m ³ /s	0.0	36.0	-4.3	35.3	35.0	-11.4	31.5	-22.6	15.9
res(4)	m ³ /s	0.0	3.4	4.3	-35.3	10.2	11.4	-31.5	-30.7	-15.9
res(9)	m ³ /s	0.0	-3.4	-4.3	-9.1	-10.2	44.2	-21.0	41.0	27.9
res(10)	m ³ /s	0.0	3.4	-45.1	9.1	-44.4	-44.2	-41.6	-41.0	-27.9
res(11)	m ³ /s	0.0	6.1	7.7	16.3	18.4	400.0	37.8	400.0	400.0
res(12)	m ³ /s	0.0	6.1	400.0	16.3	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0

```

begin
format   o 1 q 1
control  duct=16 con=1 trix=1
set      3000m=d,7000,3000,100:qw
set      20ms=d,7000,20,100 op=t,0.6 huv=e,2:qw

```



Sammanfattning av resultat

Resultatet för högsta lufthastighet i perrongdörrar vid aktiv tryckutjämning sammanställs nedan i Tabell 6.1. Flödessiffrorna visar att det krävs mycket höga flöden för att aktiv motverka höga lufthastigheter i perrongdörrar. Flödena är för flera fall flera gånger större än den aktuella brandgasventilationens dimensionerande flöde på 300 m³/s.

Slutsatsen är att aktiv tryckutjämning kräver orimligt stora flöden och är därför praktiskt olämplig. En passiv tryckutjämning med kombination av tryckutjämningschakt och brandgasventilation är bättre utformning.

Beräkningarna sker med rulltrappssystem med en nedre och övre öppning med en effektiv area om 6 respektive 12 m² som för utgångsfallet. Lufthastigheten i öppningen vid perrong är 0.8^{0.5} av den effektiva hastigheten för ett rulltrappssystem med 6 och 12 m² effektiv area i serie. Tryckfallet över 6 m² är fyra gånger tryckfallet för 12 m² eller 0.8 av hela den drivande tryckskillnaden.

Tabell 6.1 Högsta lufthastighet i perrongdörrar samt tågrörelse, flöde och tryckskillnad

metod	tågrörelse	flöde m ³ /s	tryckskillnad Pa	hastighet m/s
konstant 30 Pa	6	1004	30	6.3
konstant 0 Pa	4	871	0	0.0
konstant -30 Pa	4	1157	-30	6.3
funktion 0/60 Pa	4	555	33	6.7
funktion 30/90 Pa	4	418	55	8.8
funktion 60/120 Pa	4	285	77	10.1
tågflöde/2	4	400	56	8.6
tågflöde	9	800	40	7.3

7 Förenklad teori för tryckutjämning

Alla komponenter i tågtunnelstationssystemet kan ses som en enkel öppning mellan station Triangeln och omgivningen ovan mark, eftersom alla tryckfall i stort sett är proportionella mot flödet i kvadrat. Det är därför möjligt att förenkla hela tågtunnelstationssystemet till en enda ekvivalent öppning genom upprepad serie- och parallellkoppling av alla ingående komponenter. Flödet mellan station och omgivning är lika med störflödet för ett givet tågrörelsefall. Det sker en liten men försumbar ackumulering på grund av högre eller lägre tryck.

Den effektiva lufthastigheten v beräknas med störflöde q och effektiv läckarea A enligt (7.1).

$$v = q / A \quad (\text{m/s}) \quad (7.1)$$

Tryckskillnaden mellan station och omgivning beräknas som det dynamiska trycket eller som tryckförlusten vid fri utströmning enligt (7.2) för den effektiva hastigheten v enligt (7.1), där ρ kg/m³ är luftens densitet.

$$\Delta p = \rho v^2 / 2 \quad (\text{Pa}) \quad (7.2)$$

En komponents ekvivalenta effektiva area A m² kan bestämmas med ett känt tryckfall Δp Pa och flöde q m³/s enligt (7.3).

$$A = q (\rho / 2 \Delta p)^{0.5} \quad (\text{m}^2) \quad (7.3)$$

Komponenter kan bestå av flera seriekopplade effektiva areor med mellanliggande delar utan något tryckfall. Den effektiva arean A_s för n seriekopplade areor A_i beräknas enligt (7.4). Den effektiva arean A_s är alltid mindre än den minsta av de seriekopplade areor A_i .

$$A_s = (1 / \sum^n A_i^{-2})^{0.5} \quad (\text{m}^2) \quad (7.4)$$

Den effektiva arean A_p för n parallellkopplade areor A_i beräknas som en summa enligt (7.5).

$$A_p = \sum^n A_i \quad (\text{m}^2) \quad (7.5)$$

Lufthastigheten i en öppning med arean A_i i en följd av seriekopplade öppningar är givetvis inte lika med den effektiva lufthastigheten v utan alltid mindre och måste beräknas med flödet $A_s v$ och den enskilda arean A_i enligt (7.6).

$$v_i = A_s v / A_i \quad (\text{m/s}) \quad (7.6)$$

En öppnings effektiva area är alltid mindre än den fria geometriska öppningen. Luftströmningen dras samman till ett mindre tvärsnitt efter själva öppningen för att därefter spridas ut. Kontraktionskoefficienten är 0.6 för ett skarpkantat hål.

En sammanställning för olika komponenters effektiva area görs i Tabell 7.1. Siffervärdet 13.4 m² för en komplett tunnel med tryckutjämning inte är lika med summan av delarna 8.9 och 5.3 m². Förklaringen är att tryckfall för själva sammankopplingen ingår i totalvärdet, men inte i delvärdena. Den effektiva arean för en tågtunnel är 8.9 m², vilket inte skall förväxlas med tågtunnelns mycket större fria tvärsnittsarea.

Tabell 7.1 Effektiv area för olika komponenter och sammansättningar

komponent	antal	effektiv area m ²
tågtunnel 3000 m	(4)	8.9
tryckutjämningsschakt diameter 3200 mm	(4)	5.3
tågtunnel med tryckutjämningsschakt fram till station	4	13.4
rulltrappssystem seriekopplade effektiva areor 6+12 m ²	2	5.4
tågtunnelstation utgångsläge		64.4

Den förenklade teorin tillämpas på utgångsfallet på sidan 9 och dess tågrörelsefall och jämförs med beräkning med PFS och i Tabell 7.2 sammanställs tågrörelsefall, störflöde och effektiv area samt beräknad tryckskillnad och lufthastighet i en perrongdörr, som är 0.9 (5.4/6) av den effektiva hastigheten. Den totala arean för tågtunnelstationssystemet 64.4 m² minskas för varje aktiv tågtunnel med 8.9 m². Flera tågrörelsefall för den förenklade modellen ger samma resultat bortsett från tecken. Den förenklade modellen är symmetrisk. Det finns inga strömningsmotstånd som är riktningsberoende.

Tabell 7.2 Förenklad och PFS-beräkning av övertryck och lufthastighet i perrongdörr.

tågrörelse Tabell 1.1	störflöde m ³ /s	effektiv area m ²	tryckskillnad Pa areamodell	PFS	lufthastighet m/s areamodell	PFS
1	0	64.4	0	0	0.0	0.0
2	400	55.5	31	38	6.4	7.2
3	-400	55.5	-31	-28	-6.4	-6.1
4	800	46.6	177	170	15.4	15.1
5	0	46.6	0	3	0.0	1.9
6	-800	46.6	-177	-169	-15.5	-15.0
7	400	37.7	68	83	9.5	10.5
8	-400	37.7	-68	-53	-9.5	-8.4
9	0	28.8	0	40	0.0	7.3

Siffrorna i tabell 7.2 visar att den förenklade beräkningsmodellen ger ett resultat liknande det med PFS-beräkning. Den förenklade beräkningen ger samma sifferresultat för de tre tågrörelseparen 2-3, 4-6 och 7-8, medan motsvarande PFS-beräkningar skiljer sig åt. Tågrörelsefall 1, 5 och 9 med störflöde 0 m³/s ger inte nollresultat med PFS. Förklaringen till dessa skillnader är att tryckfallen kring tryckutjämningsschakten inte kan beskrivas med samma effektiva area. Det är skillnad på inflöde eller utflöde genom tryckutjämningsschaktet. Om tryckfallet i anslutning av tryckutjämningsschakt slopas, blir PFS-resultatet lika för tågrörelserna 0-5-9, 2-3, 4-6 och 7-8.

En slutsats är den förenklade teorin kan vara väl så användbar jämfört med PFS.

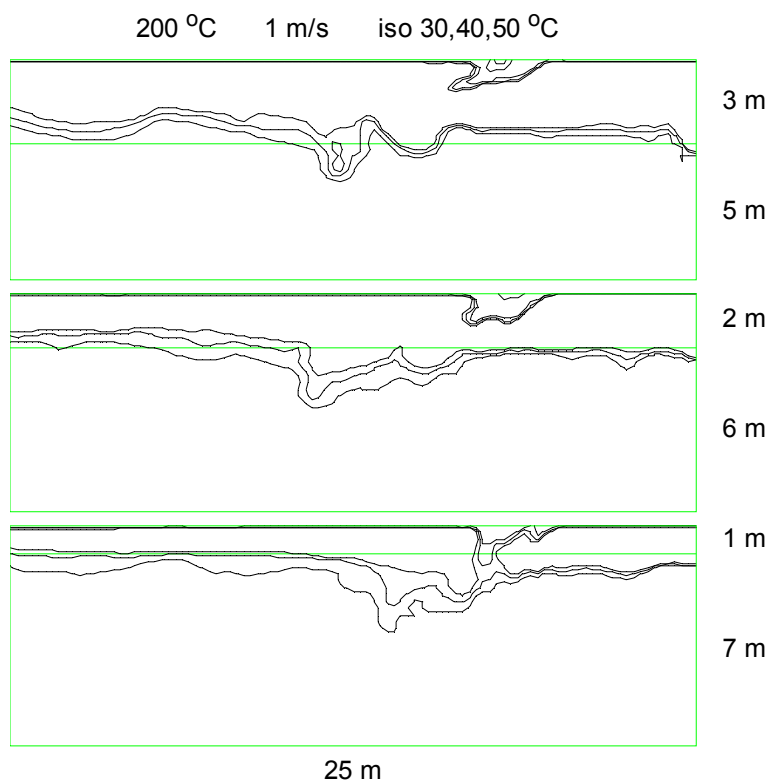
8 Omblandning vid tryckutjämningschakt

Varje tågtunnelrör med diametern 7.9 m har ett lodrät anslutet tryckutjämningschakt med diametern 3.2 m innan station Triangeln. Brandgaser från en brand inne i ett tågtunnelrör strömmar med hjälp av driftsatt brandgasventilation mot station Triangeln förbi tryckutjämningschakt där blandning sker med inströmmande uteluft. Detta innebär att brandgaser kommer in till station Triangeln på en lägre nivå än för ett fall utan tryckutjämningschakt.

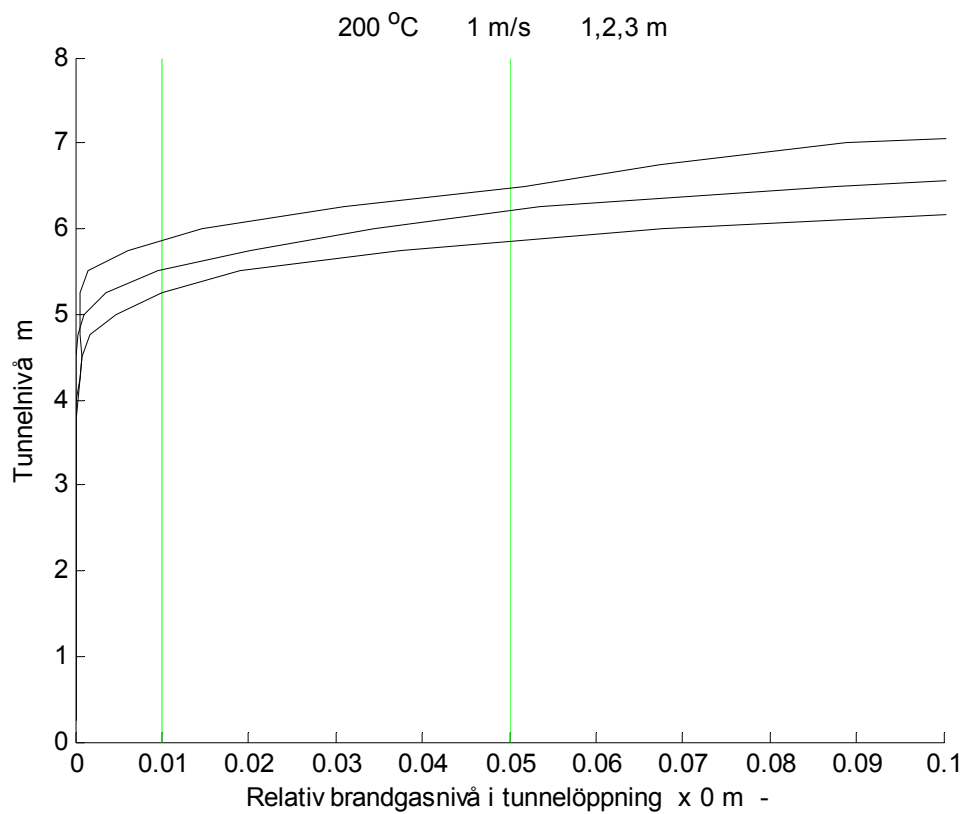
Beräkningar har gjorts med FDS enligt en modell beskriven i Appendix A för en tunneldel med längden 25 m, bredden 7.5 m och höjden 7.5 samt med ett tryckutjämningschakt med en kvadratisk form med sidan 3 m och 20 m innan tunnelslutet. Tunnelströmningshastigheten är 1 m/s. Brandgaslagret har temperaturen T_b 200 eller 400 °C och tjockleken h_b 1, 2 eller 3 m. Uteluftens neråthastighet v är 1, 2, 3 eller 4 m/s. Resultatet för alla tjugofyra kombinationer redovisas i Figur 8.1-16 parvis med temperaturisolinjer 30, 40 och 50 °C för en längdmittsektion samt relativ medelbrandgasnivå för tunnelluften som funktion av tunnelnivå. Brandgasnivå i en punkt är en omräkning av lufttemperaturen i samma punkt. Temperaturen 38 °C för brandgaslagertemperaturen 200 °C räknas om till brandgasnivån 0.1 $((38-20)/(200-20))$.

Tabell 8.1 Sammanställning av beräkningsfall och nivå för relativ brandgasnivå 0.01 och 0.05

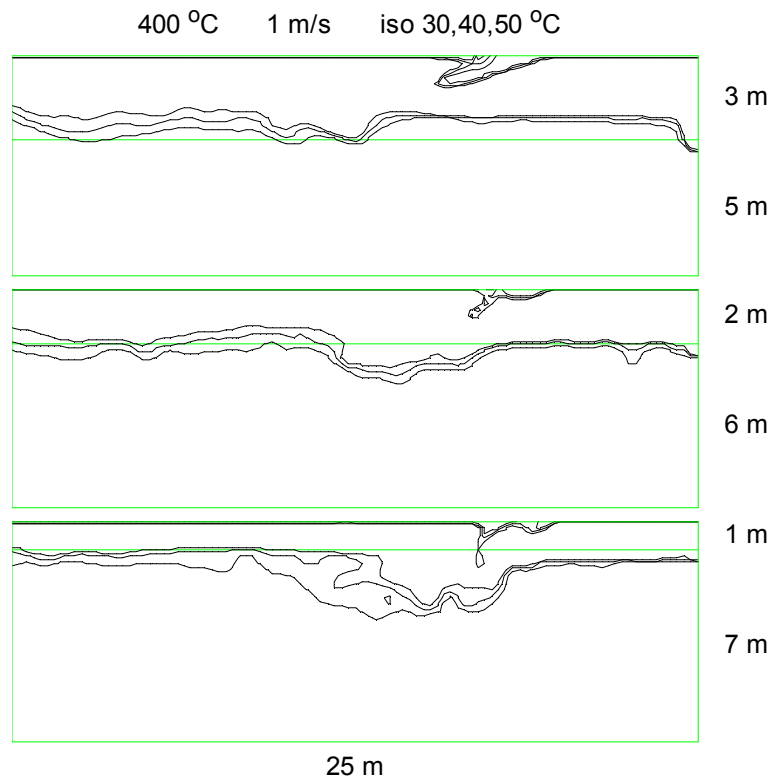
fall	v m/s	T_b °C	h_b m	Figur 8.	$z_{c\ 0.01}$ m	$z_{c\ 0.05}$ m
1	1	200	1	1-2	5.9	6.5
2	1	200	2	1-2	5.5	6.2
3	1	200	3	1-2	5.2	5.9
4	1	400	1	3-4	6.0	6.9
5	1	400	2	3-4	5.8	6.4
6	1	400	3	3-4	5.6	6.1
7	2	200	1	5-6	5.4	6.9
8	2	200	2	5-6	3.7	6.5
9	2	200	3	5-6	3.7	5.7
10	2	400	1	7-8	5.5	7.1
11	2	400	2	7-8	4.6	6.8
12	2	400	3	7-8	4.7	5.8
13	3	200	1	9-10	4.1	6.9
14	3	200	2	9-10	1.0	6.4
15	3	200	3	9-10	0.8	5.5
16	3	400	1	11-12	5.0	7.1
17	3	400	2	11-12	3.2	6.9
18	3	400	3	11-12	3.2	6.4
19	4	200	1	13-14	0.9	6.8
20	4	200	2	13-14	< 0	6.5
21	4	200	3	13-14	< 0	4.8
22	4	400	1	15-16	3.9	7.1
23	4	400	2	15-16	0.4	6.8
24	4	400	3	15-16	1.1	6.5



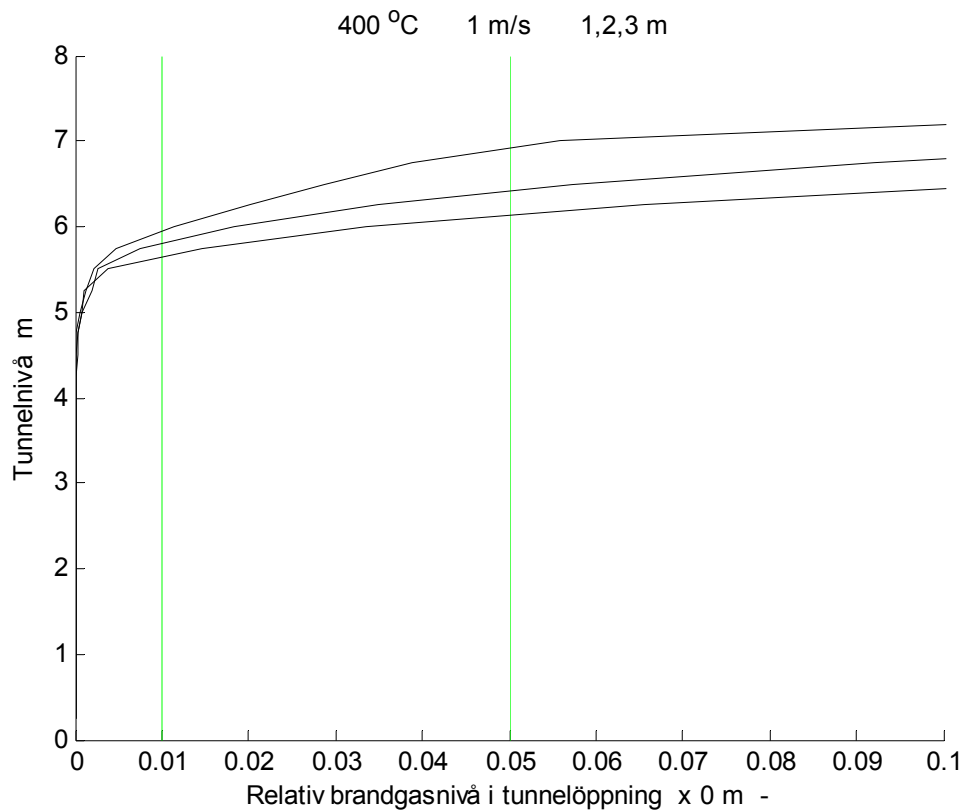
Figur 8.1 Isolinjer 30,40,50 °C för brandgastemperatur 200 °C och nerhastighet 1 m/s.



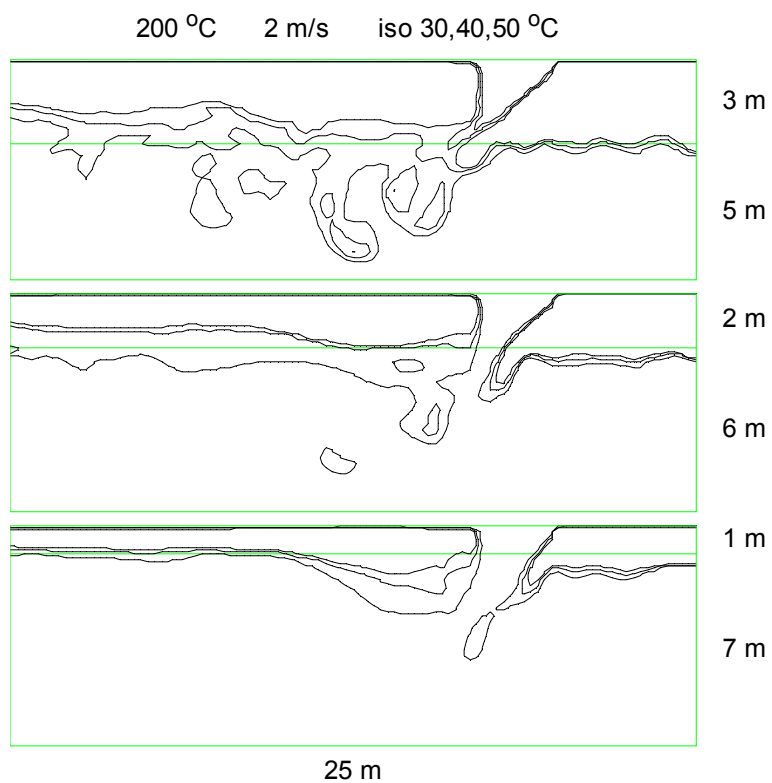
Figur 8.2 Relativ brandgasnivå i tunnelöppning x 0 m för fall i Figur 8.1.



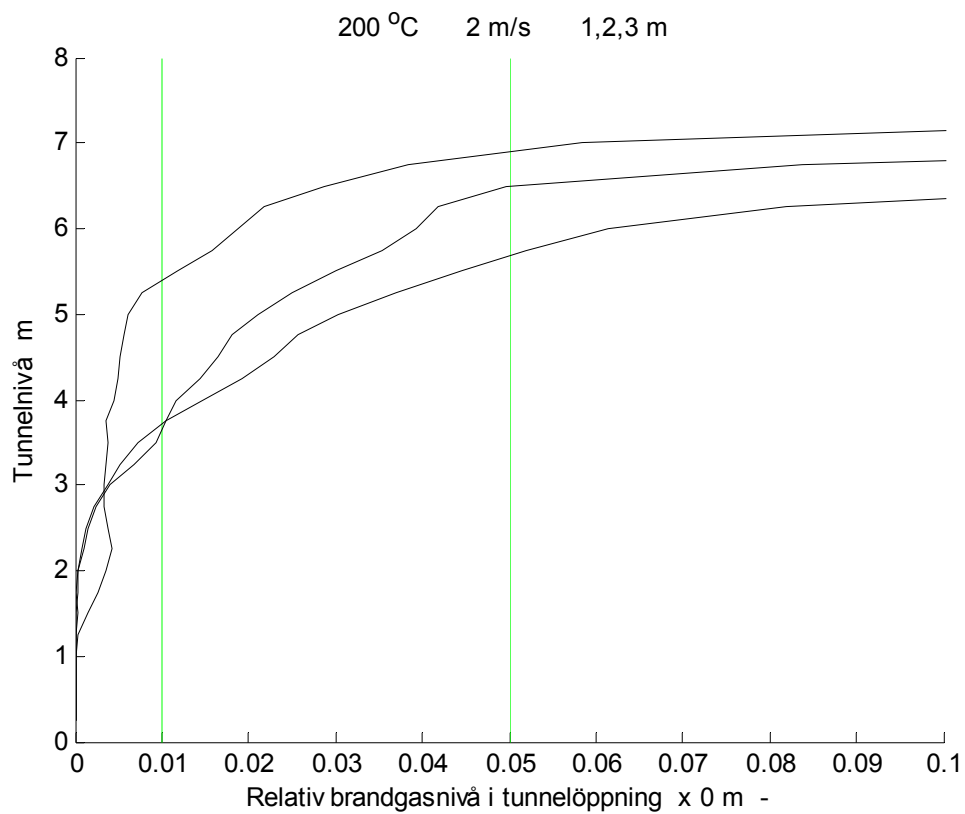
Figur 8.3 Isolinjer 30,40,50 °C för brandgastemperatur 400 °C och nerhastighet 1 m/s.



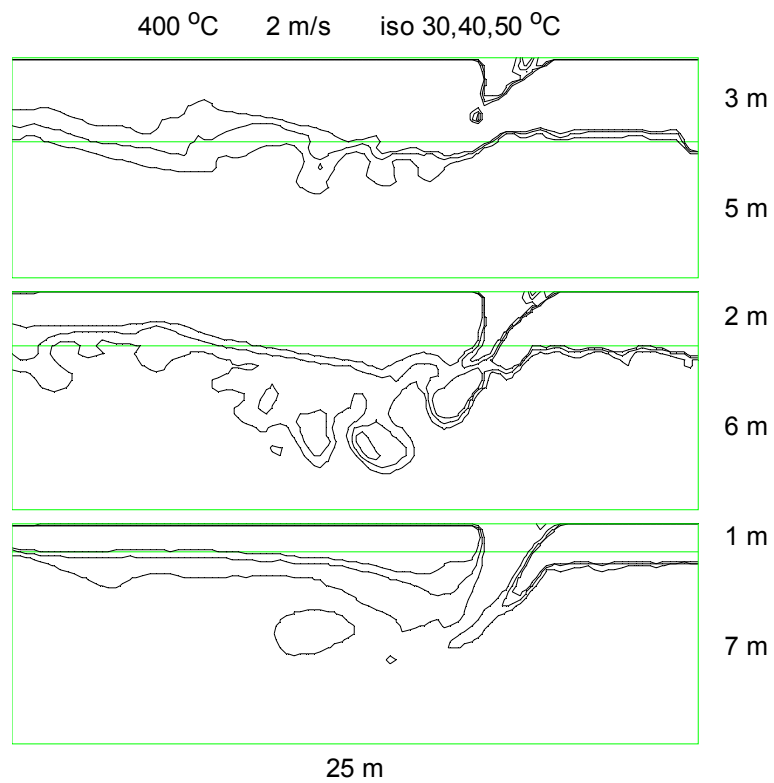
Figur 8.4 Relativ brandgasnivå i tunnelöppning x 0 m för fall i Figur 8.3.



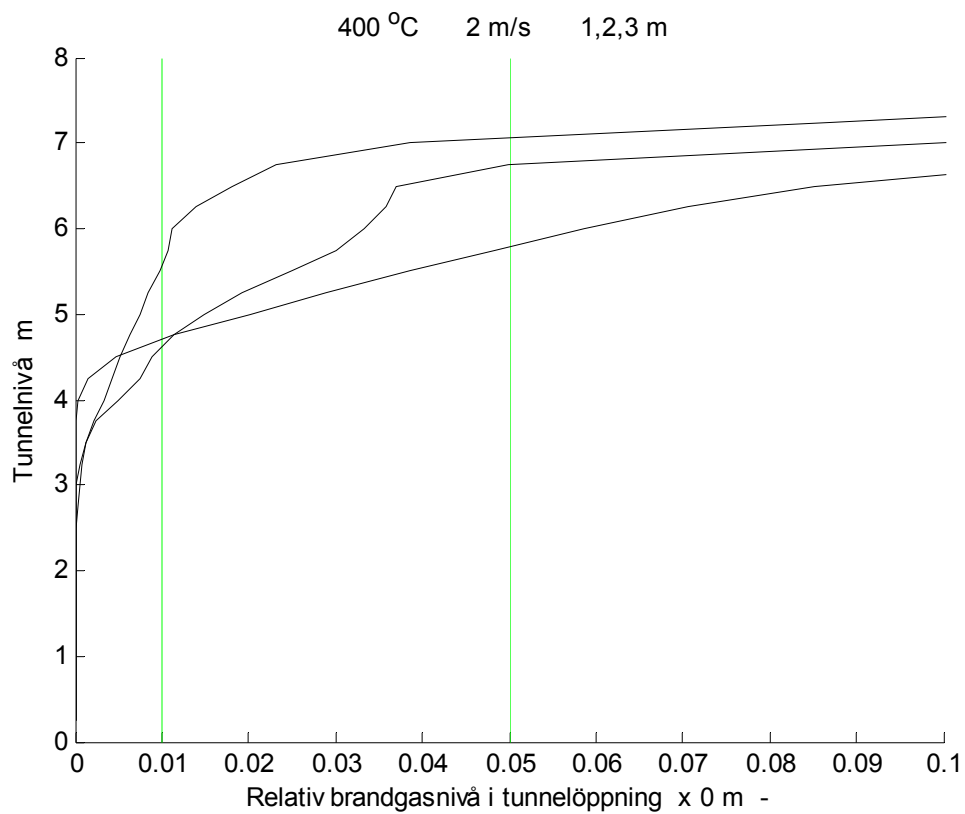
Figur 8.5 Isolinjer 30,40,50 °C för brandgastemperatur 200 °C och nerhastighet 2 m/s.



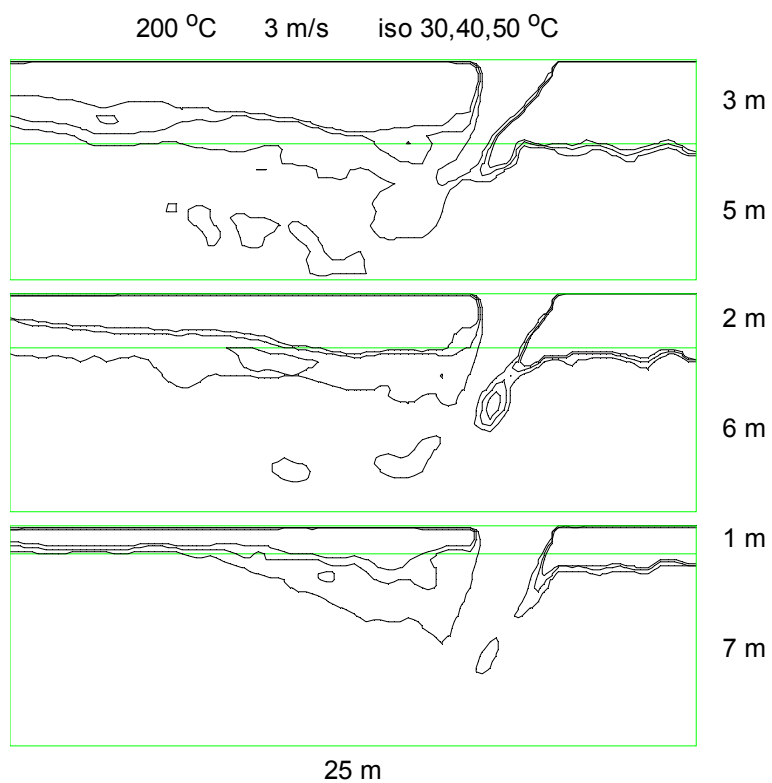
Figur 8.6 Relativ brandgasnivå i tunnelöppning x 0 m för fall i Figur 8.5.



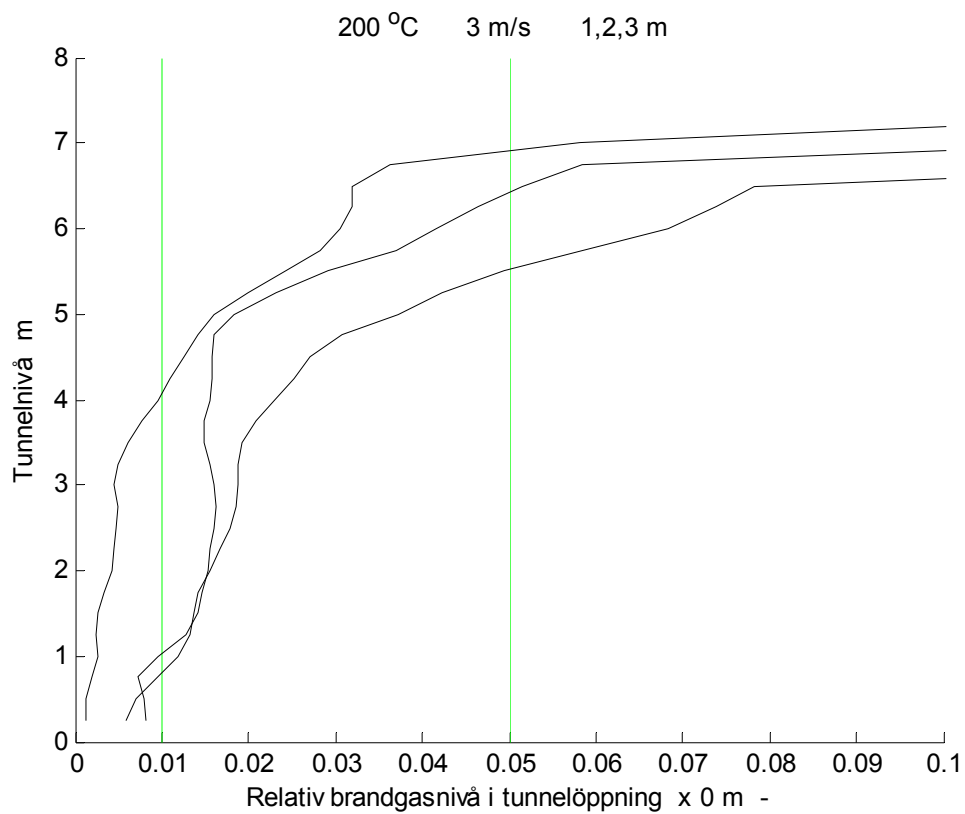
Figur 8.7 Isolinjer 30,40,50 °C för brandgastemperatur 400 °C och nerhastighet 2 m/s.



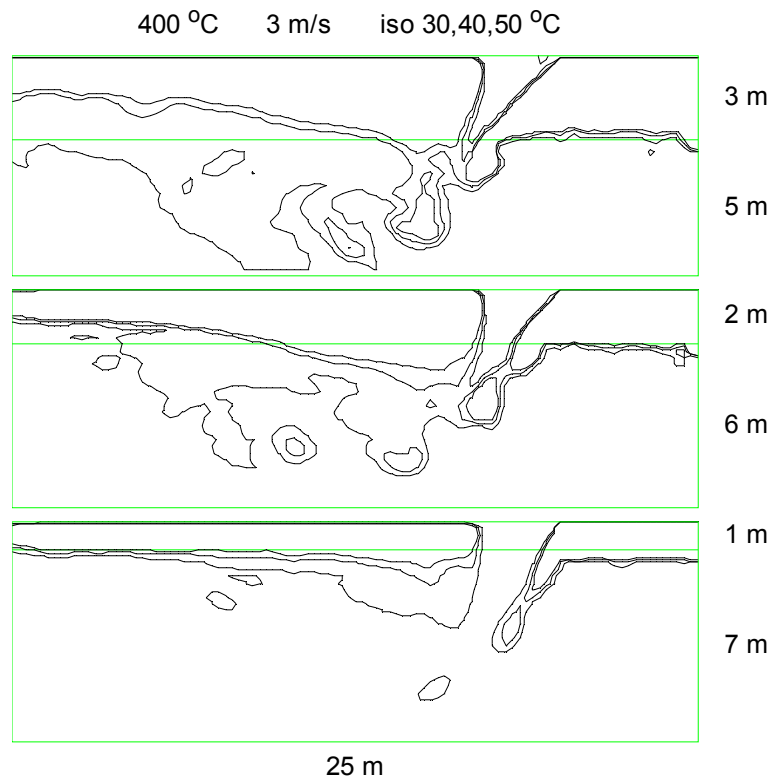
Figur 8.8 Relativ brandgasnivå i tunnelöppning x 0 m för fall i Figur 8.7.



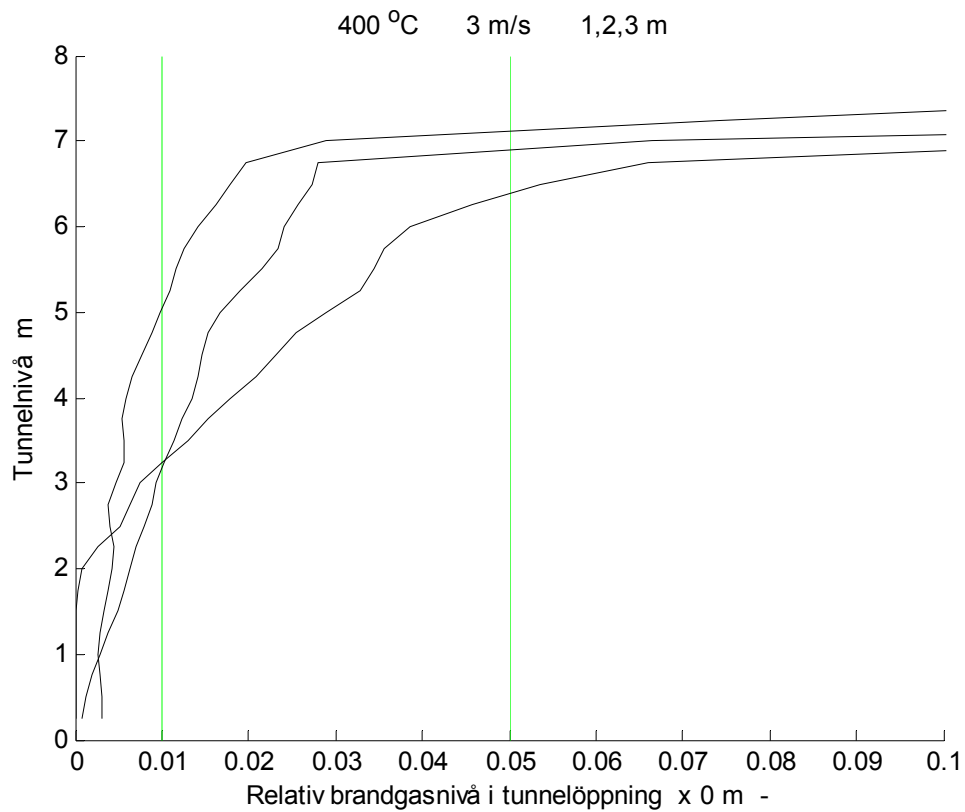
Figur 8.9 Isolinjer 30,40,50 °C för brandgastemperatur 200 °C och nerhastighet 3 m/s.



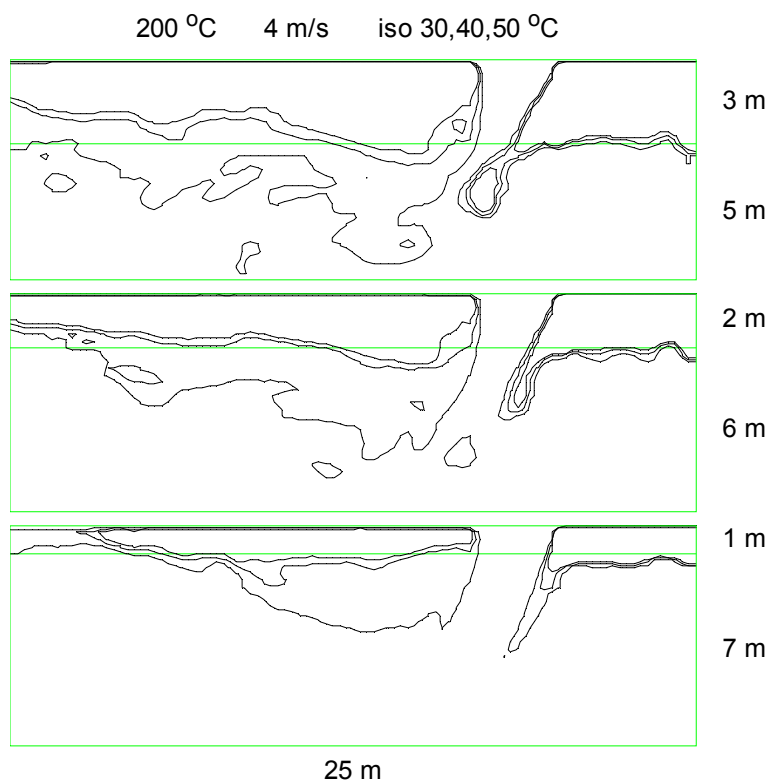
Figur 8.10 Relativ brandgasnivå i tunnelöppning x 0 m för fall i Figur 8.9.



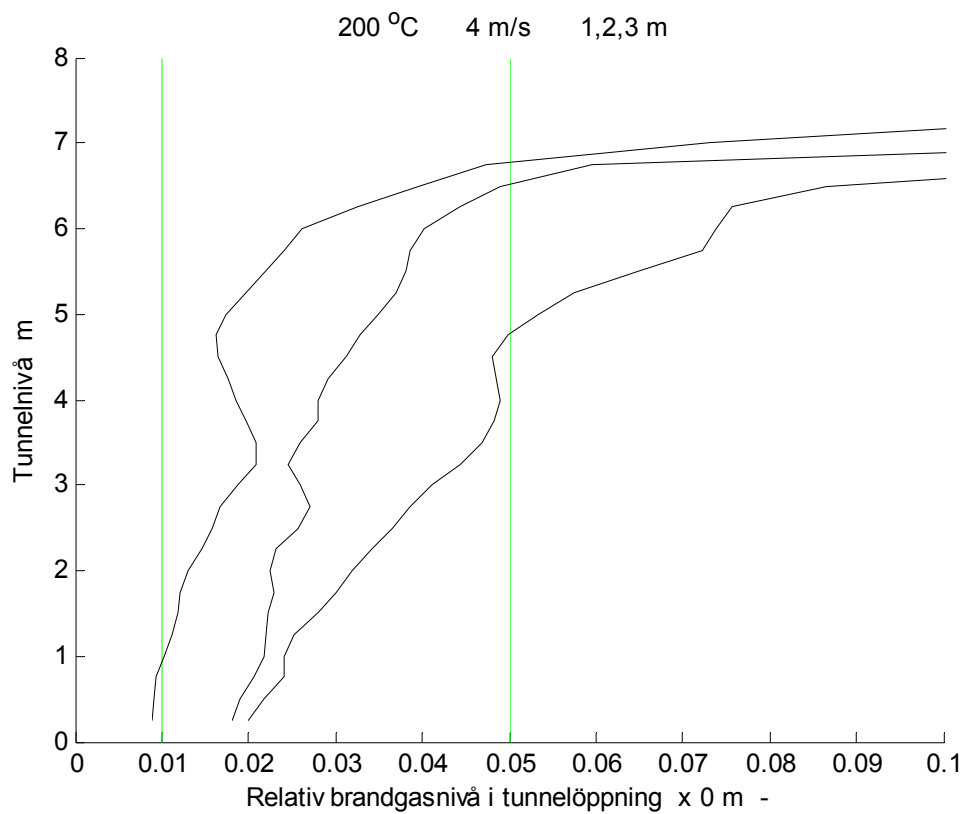
Figur 8.11 Isolinjer 30,40,50 °C för brandgastemperatur 400 °C och nerhastighet 3 m/s.



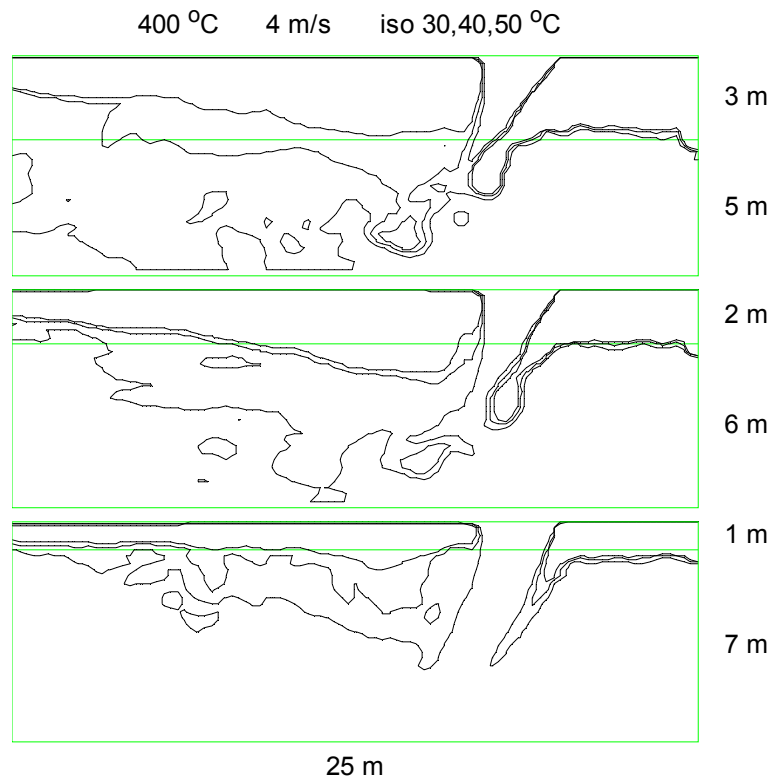
Figur 8.12 Relativ brandgasnivå i tunnelöppning x 0 m för fall i Figur 8.11.



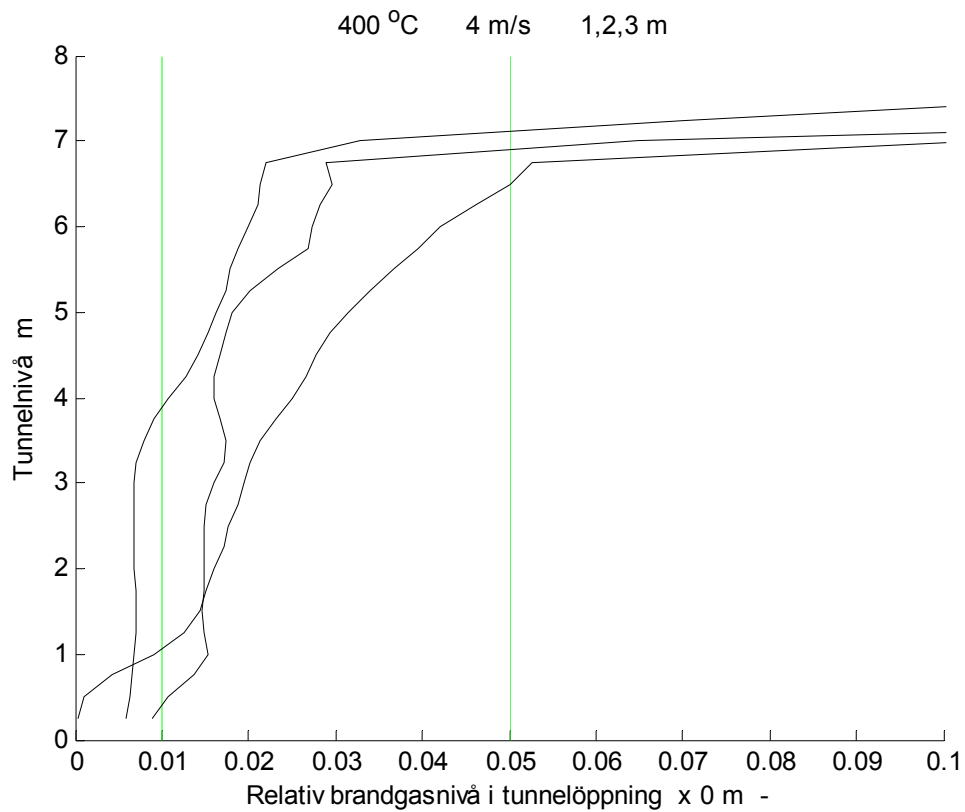
Figur 8.13 Isolinjer 30,40,50 °C för brandgastemperatur 200 °C och nerhastighet 4 m/s.



Figur 8.14 Relativ brandgasnivå i tunnelöppning x 0 m för fall i Figur 8.13.



Figur 8.15 Isolinjer 30,40,50 °C för brandgas temperatur 400 °C och nerhastighet 4 m/s.



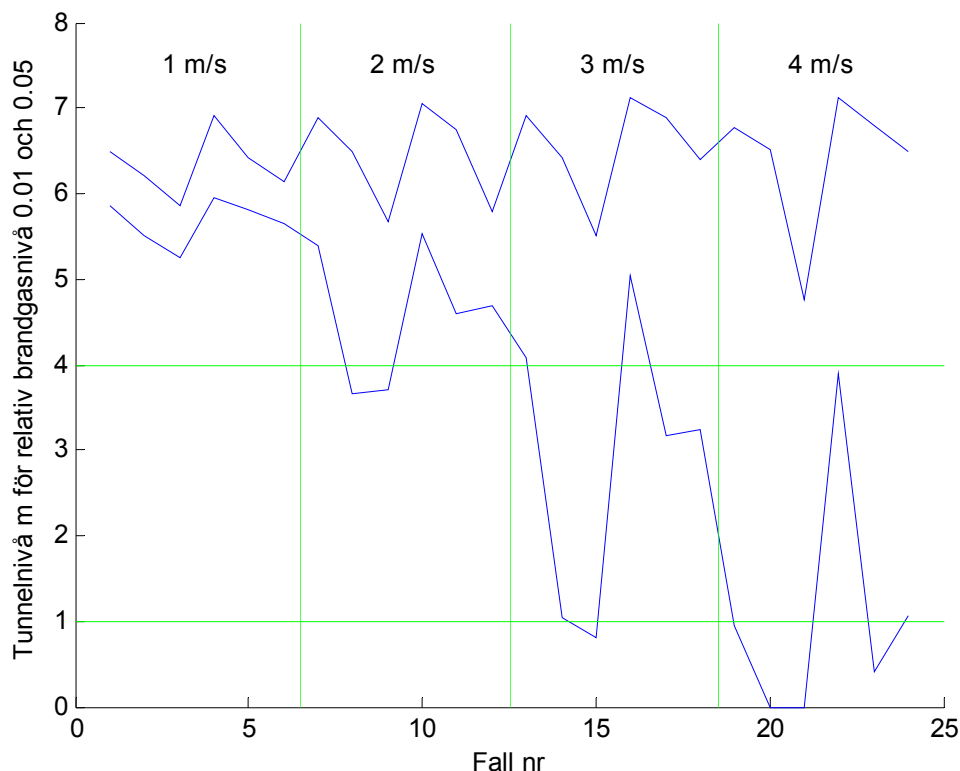
Figur 8.16 Relativ brandgasnivå i tunnelöppning x 0 m för fall i Figur 8.15.

En relativ brandgasnivå om $c = 0.01$ är en tillräcklig utspädning för lokaler med sovande personer och för övriga lokaler är kravet $c = 0.05$, vilket kan tillämpas för en station. Siffervärdena för tunnelnivå för relativ brandgasnivå 0.01 och 0.05 redovisas i Tabell 8.1 och i Figur 8.17 som funktion av tabellrad eller fall. Den övre kurvan, relativ brandgasnivå 0.05, i Figur 8.17 visar att tunnelnivån aldrig understiger 4 m, vilket är på en betryggande höjd över perrongnivå. Den nedre kurvan, relativ brandgasnivå 0.01, visar att omblandning når ner till nivån 1 m i sju fall av tjugofyra.

Omblandning med brandgaser medför att tunnelluften blir något varmare och när den når fram till station Triangeln kommer den att stiga uppåt i stationshallen, som är högre än själva tågtunnelrören. Utrymning från perrongen kommer därför inte att påverkas.

Omblandning med brandgaser medför att sikten i den nedre delen av tunneln försämras. Om extinktionskoefficienten för brandgaserna är 10 m^{-1} , ett inte extremt värde, kan rumsytor i outspädda brandgaser ses på avståndet 0.2 m och för en utspädning till 0.01 blir siktavståndet 20 m. Siktkravet i obekanta omgivningar är 10 m.

Den nedre kurvan i Figur 8.17 visar att sikten försämras betydligt i den nedre delen av tågtunnelröret efter inblandningen av uteluft. Fall 13-18 och 19-24 gäller för uteluftshastigheter om 3 respektive 4 m/s. Tidigare redovisade beräkning med PFS visar att uteluftshastigheten är omkring 3 m/s vid driftsatt brandgasventilation.



Figur 8.17 Tunnelnivå för relativ brandgasnivå 0.01 och 0.05 som för fall i Tabell 8.1.

Det går att uppskatta när inströmningen går igenom brandgaslagret och skapar omblandning samt nerdragning av brandgaser mot golvnivå. Kravet är att inflödets dynamiska tryck skall vara större än brandgaslagrets termiska tryckskillnad. Detta samband kan skriva om till ett krav för inströmningshastigheten enligt (8.1) nedan för genomslag.

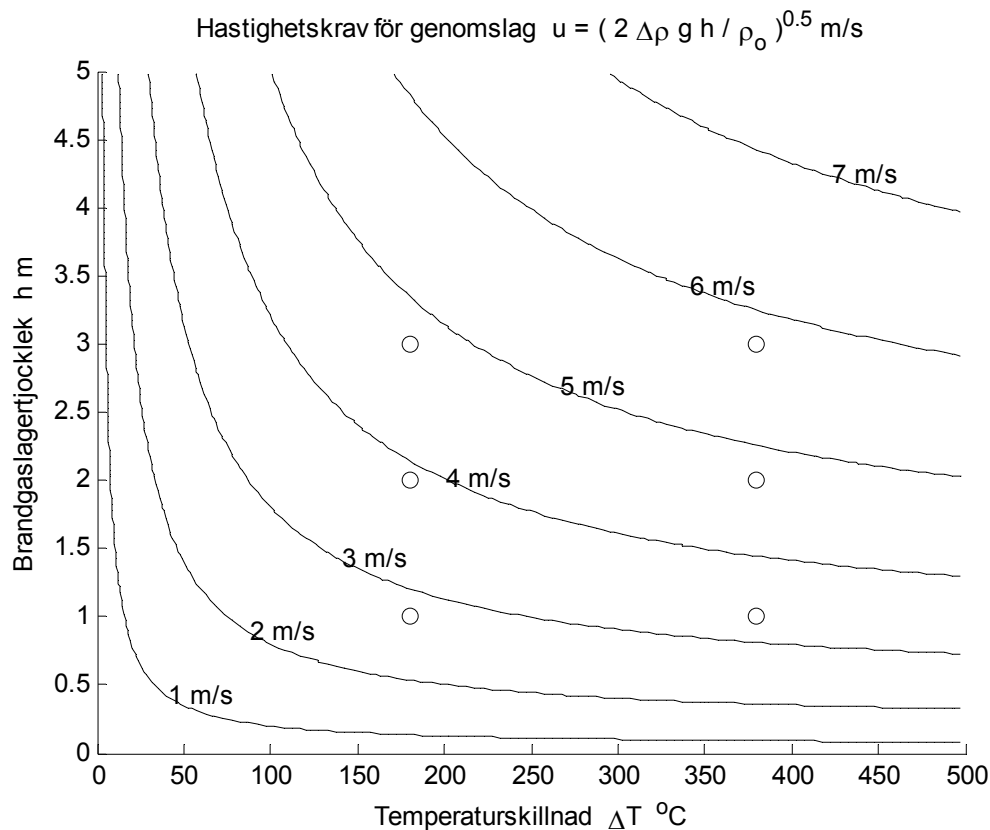
$$u = (2 \Delta \rho g h / \rho_o)^{0.5} \quad (\text{m/s}) \quad (8.1)$$

$\Delta \rho$	densitetsskillnad, kg/m^3
g	jordacceleration, m/s^2
h	brandgaslager tjocklek, m
ρ_o	luftflödets densitet, kg/m^3

Sambandet (8.1) redovisas även i Figur 8.18 med ett isodiagram för genomslagshastigheten som funktion av temperaturskillnad och tjocklek. De sex testade brandgaslagerfallen med temperaturskillnad 180 och 380 °C samt tjocklek 1, 2 och 3 m är inprickade i Figur 8.18 och redovisas i Tabell 8.2.

Tabell 8.2 Genomslagshastighet enligt (8.1)

ΔT °C \ h m	1	2	3
180	2.7	3.9	4.7
380	3.3	4.7	5.8



Figur 8.18 Krav för genomslag av brandgaslager med olika temperaturskillnad och tjocklek.

En jämförelse med simuleringsresultatet i Figur 8.1(2)15 visar att genomslag sker för fler fall än vad uttrycket (8.1) anger som genomslagshastighet. Tabell 8.2 visar att genomslag inte skall ske för de testade hastigheterna 1 och 2 m/s. Fall 7, 8 och 10 enligt Tabell 8.1 med hastigheten 2 m/s bedöms ha genomslag trots att motsvarande hastighetskrav är 2.7, 3.9 respektive 3.3 m/s.

Hastigheten 3 m/s skall ha genomslag för fall 13 enligt uttryck (8.1), men genomslag bedöms även ske för fall 14 och 16 med hastighetskrav 3.9 respektive 3.3 m/s.

Hastigheten 4 m/s skall ha genomslag för fall 19, 20, 22, men här sker även genomslag för fall 21 och 23 med hastighetskrav 4.7 respektive 4.7 m/s.

En avslutande slutsats är att uttrycket (8.1) genomgående överskattar genomslagshastigheten.

Uttrycket (8.1) kan justeras något genom att inströmningens dynamiska tryck skall vara större än brandgaslagrets halva termiska tryckskillnad, vilket ger följande uttryck:

$$u = (\Delta \rho g h / \rho_o)^{0.5} \quad (\text{m/s}) \quad (8.2)$$

En reviderad genomslagshastighetsgräns redovisas i Tabell 8.3 för de sex brandgaslagerfallen. En genomgång av testfallen 1-24 i Tabell 8.1 visar på en mycket bättre överensstämmelse mellan teori och simulering.

Tabell 8.3 Genomslagshastighet enligt (8.2)

ΔT °C \ h m	1	2	3
180	1.9	2.7	3.3
380	2.4	3.3	4.1

Hastighetskraven kan redovisas med ett isodiagram som i Figur 8.18, men det görs inte här utan i nästa avsnitt med samma hastighetskrav enligt (8.2) för en annan tillämpning.

En viktig anmärkning är att neråthastigheten är indata till beräkningsprogrammet FDS och är helt oberoende av annan påverkan. Detta innebär att brandgaslager med sitt termiska övertryck inte kan balansera eller påverka neråtströmningen.

Slutsatserna kan sammanfattas med att vid driftsatt brandgasventilation omblandas brandgaser och uteluft, blandningen påverkar dock inte utrymning av stationsperrongen, men sikten i själva tågtunnelröret försämras betydligt.

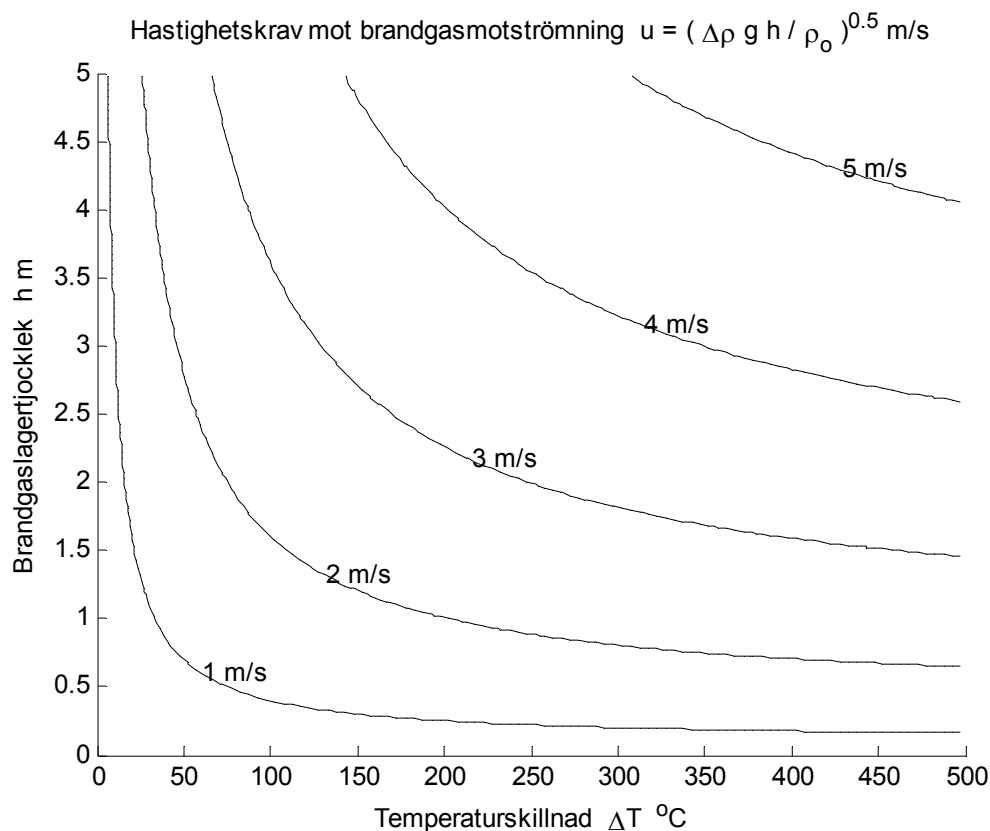
9 Motströmning vid brandgaskontroll

Avsikten med detta avsnitt är att undersöka hur brandgaser från en brand i en tunnel strömmar beroende på olika påtvingad luftströmning. Denna påtvingade luftströmning är resultatet av brandgasventilation eller brandgaskontroll. Brandgaserna kan strömma mot den påtvingade huvudströmningen närmast tunneltaket på grund av sin höga temperatur. Det finns ett enkel beräkningsuttryck enligt (9.1) nedan för att bestämma en luftströmningshastighet u som förhindrar att brandgaser strömmar mot påtvingad luftströmning.

$$u = (\Delta\rho g h / \rho_o)^{0.5} \quad (\text{m/s}) \quad (9.1)$$

$\Delta\rho$	densitetsskillnad, kg/m^3
g	jordacceleration, m/s^2
h	brandgaslager tjocklek, m
ρ_o	luftflödets densitet, kg/m^3

Uttrycket (9.1) kommer från en tryckbalans mellan luftflödets dynamiska tryck $\rho_o u^2/2$ och brandgaslagrets medeltrycksskillnad $\Delta\rho g h/2$ räknat över brandgaslagrets tjocklek.



Figur 9.1 Hastighetskrav mot motströmning av brandgaslager.

Hastighetsisolinjerna i Figur 9.1 visar att det krävs höga lufthastigheter för att förhindra motströmning. Motströmning för ett brandgaslager med temperaturskillnaden 100 °C och tjockleken 1 m förhindras med hastigheten 1.6 m/s och för 200 °C och 2 m krävs 2.8 m/s.

Beräkningar har genomförts med FDS för en tunnelmodell enligt Appendix B med längden 256 m, bredden 7.5 m och höjden 7.5 m. En brand var placerad mellan 190 och 210 m från ena änden i form av en parallelepiped med längden 20 m, bredden 4 m och höjden 3.75 m. Brandeffekten var 130 MW fördelat över parallelepipedens fem synliga ytor om 260 m² med den ytspecifika effekten 0.5 MW/m².

Resultatet för fem beräkningsfall med den påtvingade hastigheten 1, 2, 3, 4 och 5 m/s redovisas med det motströmmande brandgaslagrets temperatur och dess tjocklek parvis i Figur 9.2-11 för fem olika tidpunkter, nämligen 20, 40, 60, 80 och 100 s. Beräkningstiden var 100 s. Den påtvingade hastigheten avser hela tunneltvärsnittet vid position x 256 m. Detta innebär att hastigheten är högre under det motströmmande brandgaslagret. Brandens tunnelposition är markerad med två lodräta linjer i Figur 9.2-11. Tunnelöppningen motsvaras av position x 0 m och den påtvingade lufthastigheten ansätts i tunnelposition x 256 m.

De redovisade temperaturerna och tjocklekarna avser motströmmande gas, vilket blir brandgaslagret till vänster om branden med tunnelposition x 0-200 m. Kurvorna till höger om branden med tunnelposition 200-250 m är från höger till branden framströmmande tunnelluft med låg temperatur. Denna tunneldel till höger om branden med konstiga värden kunde ha utelämnats, men det har inte gjorts. De fem hastighetsfallen kommenteras som följer.

Kurvorna i Figur 9.2 och 9.3 för lufthastigheten 1 m/s visar att motströmning gått 200 m på mindre än 40 s. Brandgaslagret befinner sig efter 20 s 120 m från branden eller 80 m från tunnelöppningen. Brandgaslagrets tjocklek är i stort sett 3 m och dess temperatur är avtagande från branden till omkring 300 °C vid tunnelöppningen.

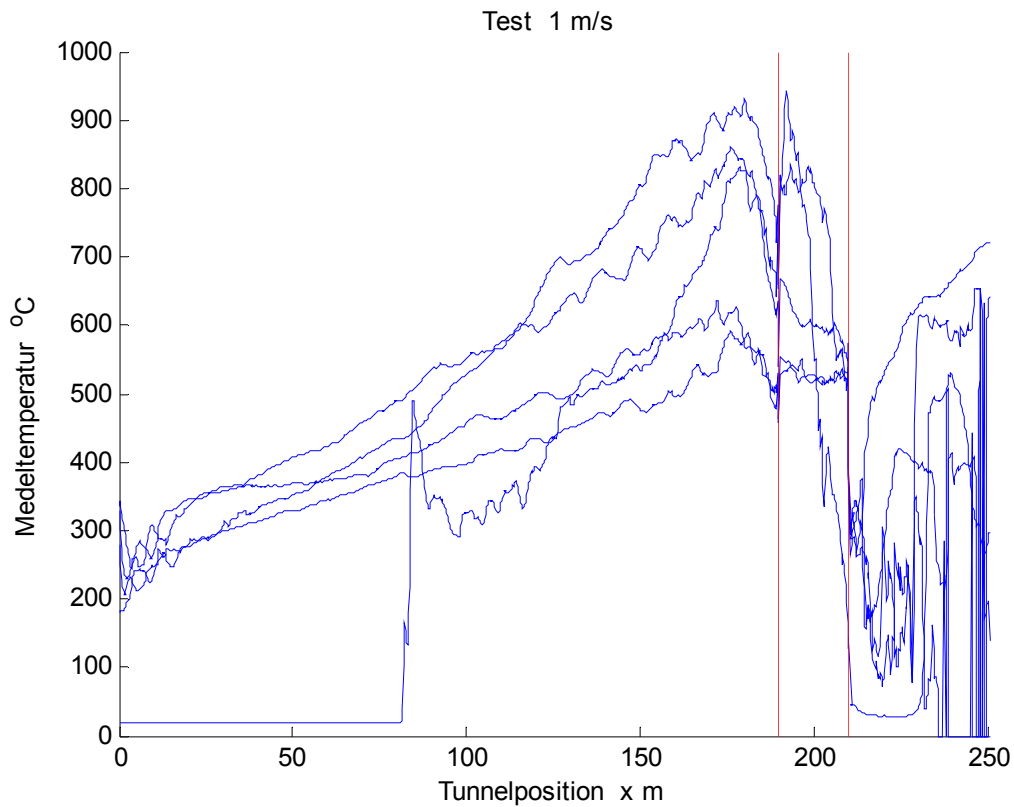
Kurvorna i Figur 9.4 och 9.5 för lufthastigheten 2 m/s visar att motströmning gått 200 m på mindre än 60 s. Brandgaslagret befinner sig efter 20 s 100 m från branden och efter 40 s 180 m från branden. Brandgaslagrets tjocklek är något mindre än 3 m och dess temperatur är avtagande från branden till omkring 250 °C vid tunnelöppningen.

Kurvorna i Figur 9.6 och 9.7 för lufthastigheten 3 m/s visar att motströmning gått 200 m på mindre än 80 s. Brandgaslagret befinner sig efter 20, 40 och 60 s 90, 150 respektive 180 m från branden. Brandgaslagrets tjocklek är något över 2 m och dess temperatur är avtagande från branden till omkring 150 °C vid tunnelöppningen.

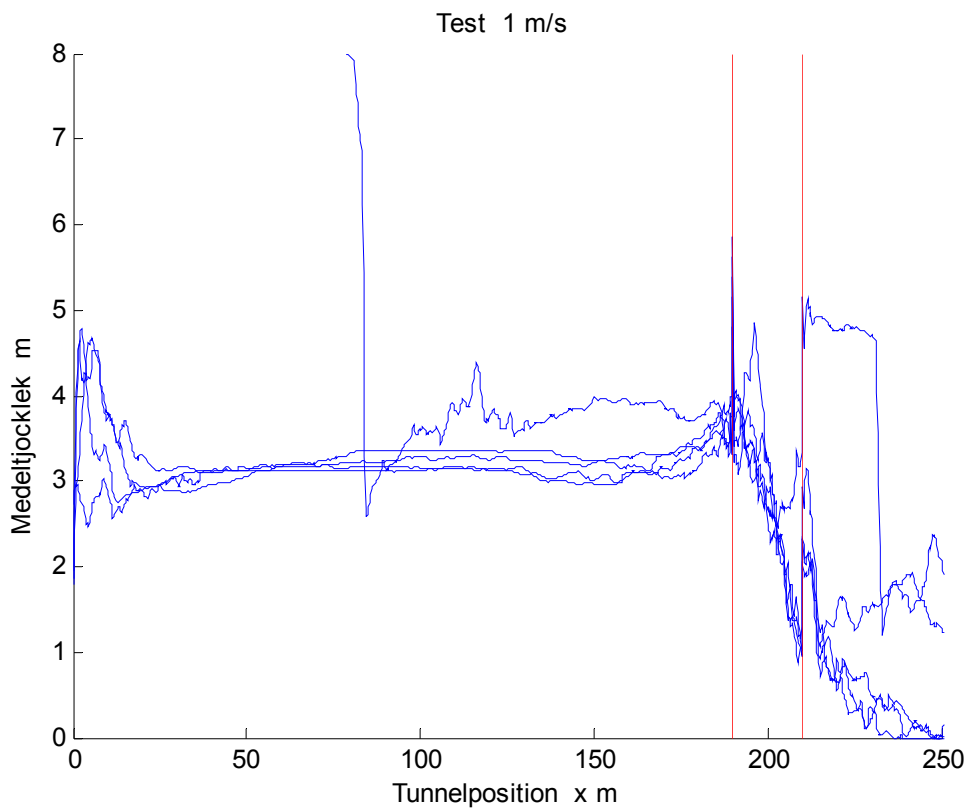
Kurvorna i Figur 9.8 och 9.9 för lufthastigheten 4 m/s visar att brandgaslagret befinner sig efter 20, 40, 60, 80 och 100 s 70, 110, 130, 160 respektive 180 m från branden. Brandgaslagrets tjocklek är något under 2 m och dess temperatur är avtagande från branden till omkring 100 °C vid tunnelöppningen.

Kurvorna i Figur 9.10 och 9.11 för lufthastigheten 5 m/s visar att motströmningen efter 100 s har rört sig 140 m. Brandgaslagrets temperatur och tjocklek är omkring 100 °C respektive omkring 1.5 m i fronten.

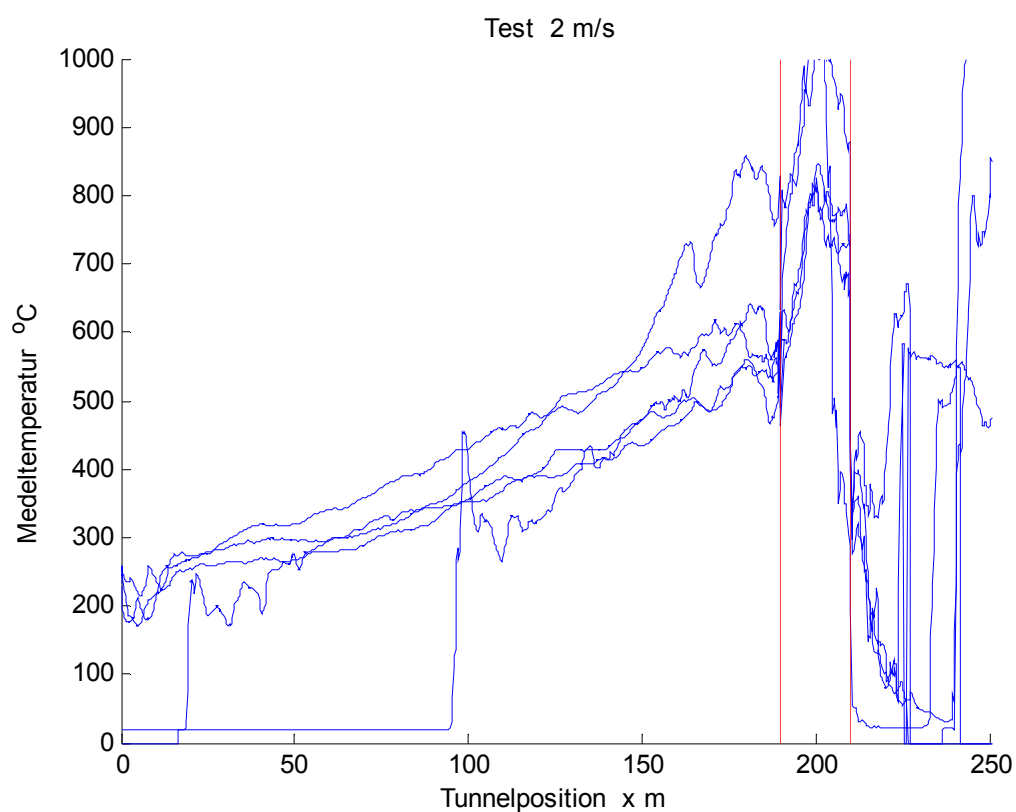
Fallet med 6 m/s har genomräknats med resultat ingen motströmning och redovisas inte.



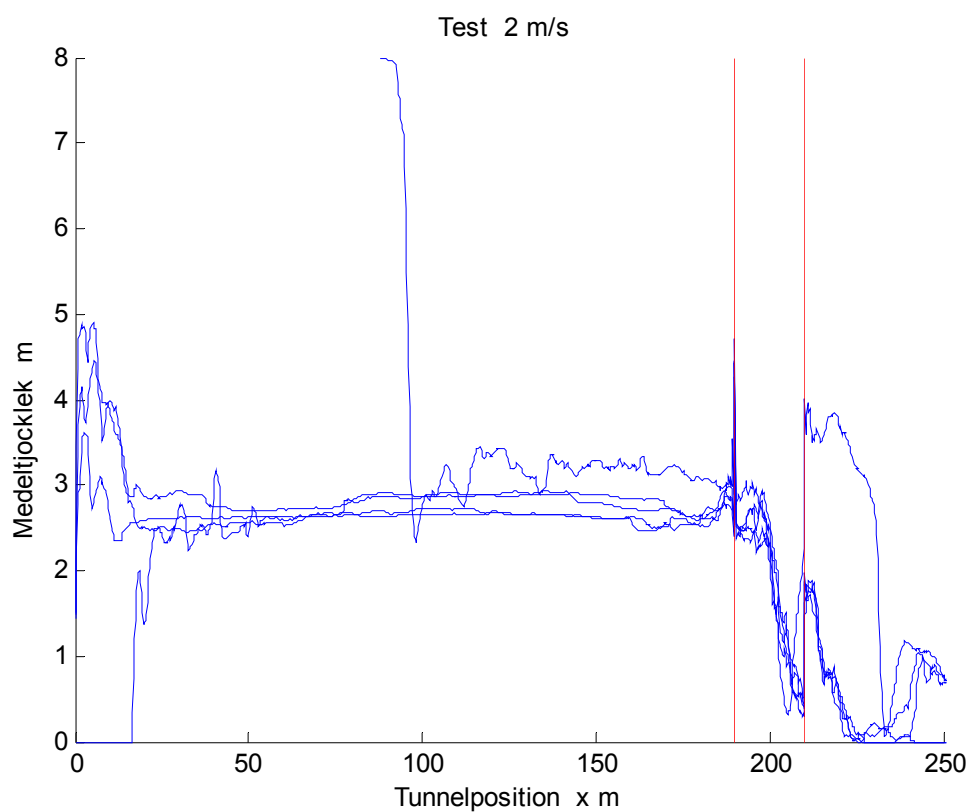
Figur 9.2 Medeltemperatur för brandgaslager i tunneldel vid motströmning vid 1 m/s.



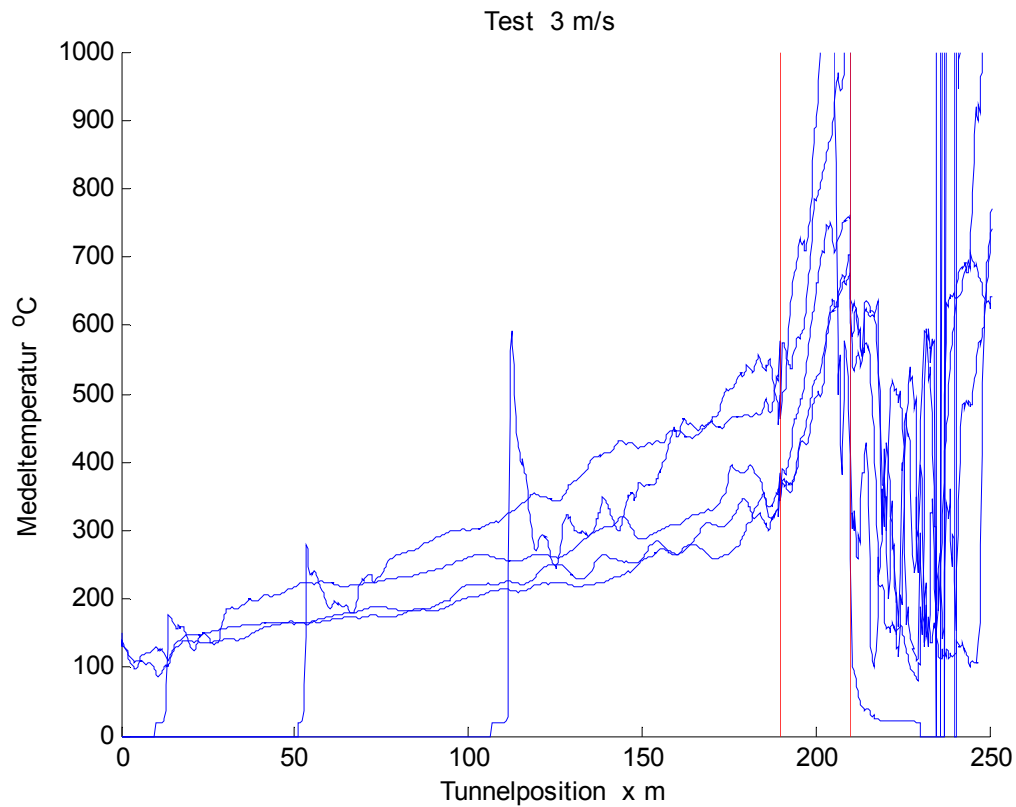
Figur 9.3 Medeltjocklek för brandgaslager i tunneldel vid motströmning 1 m/s.



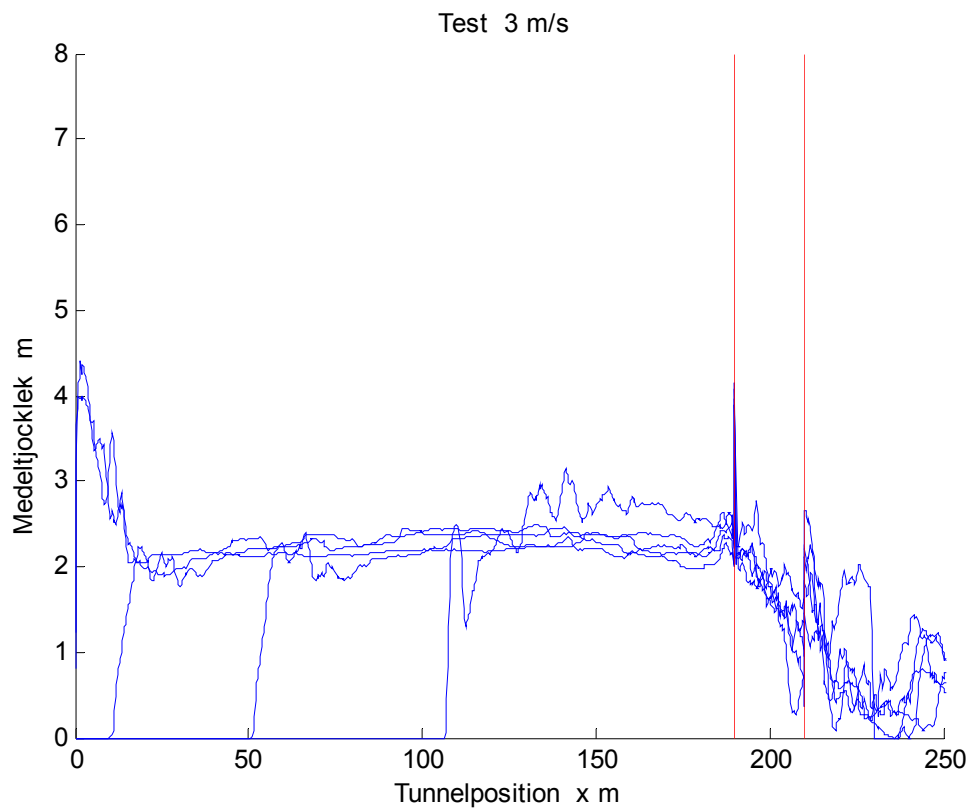
Figur 9.5 Medeltemperatur för brandgaslager i tunneldel vid motströmning vid 2 m/s.



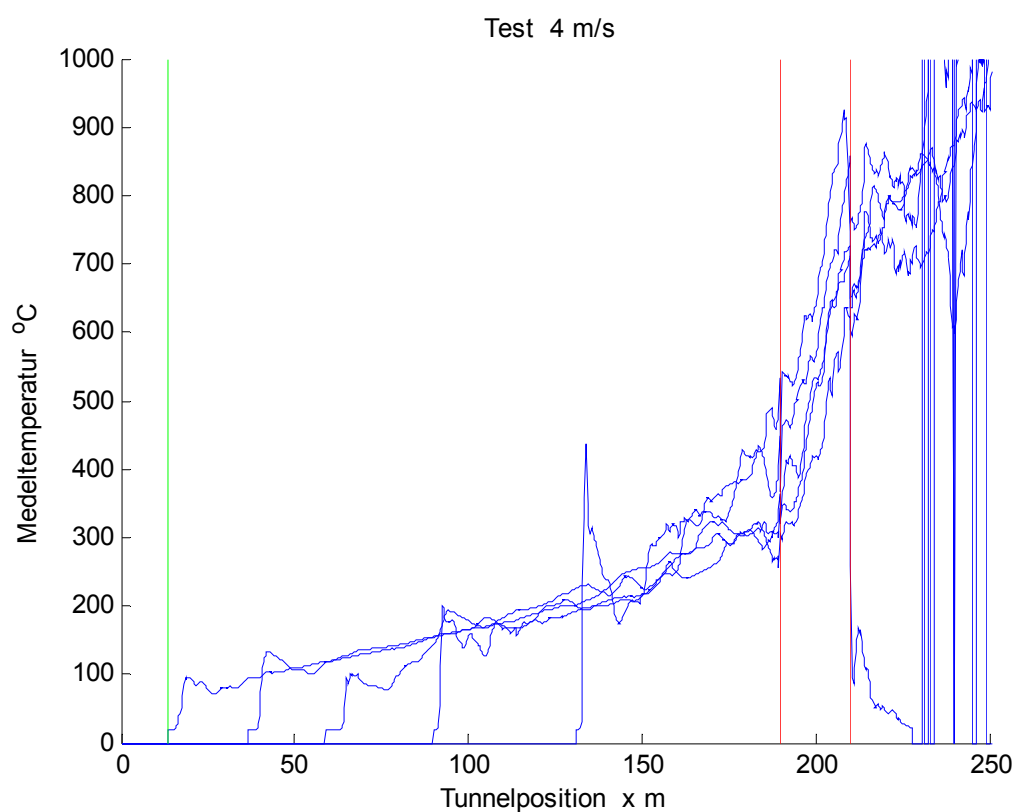
Figur 9.5 Medeltjocklek för brandgaslager i tunneldel vid motströmning 2 m/s.



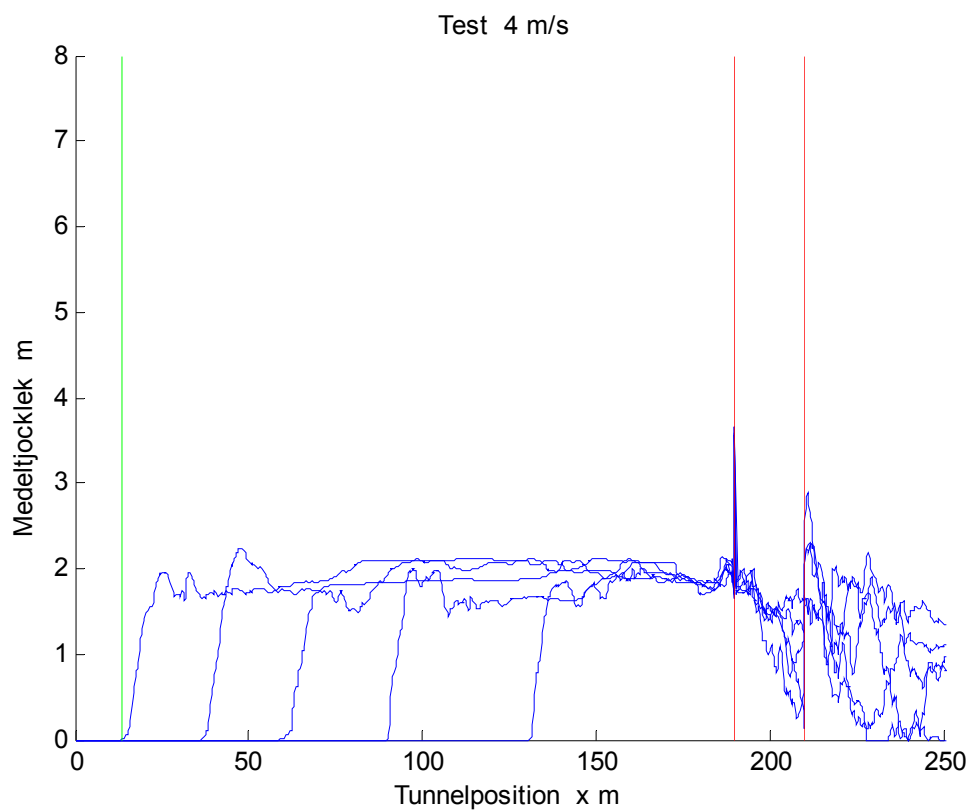
Figur 9.6 Medeltemperatur för brandgaslager i tunneldel vid motströmning vid 3 m/s.



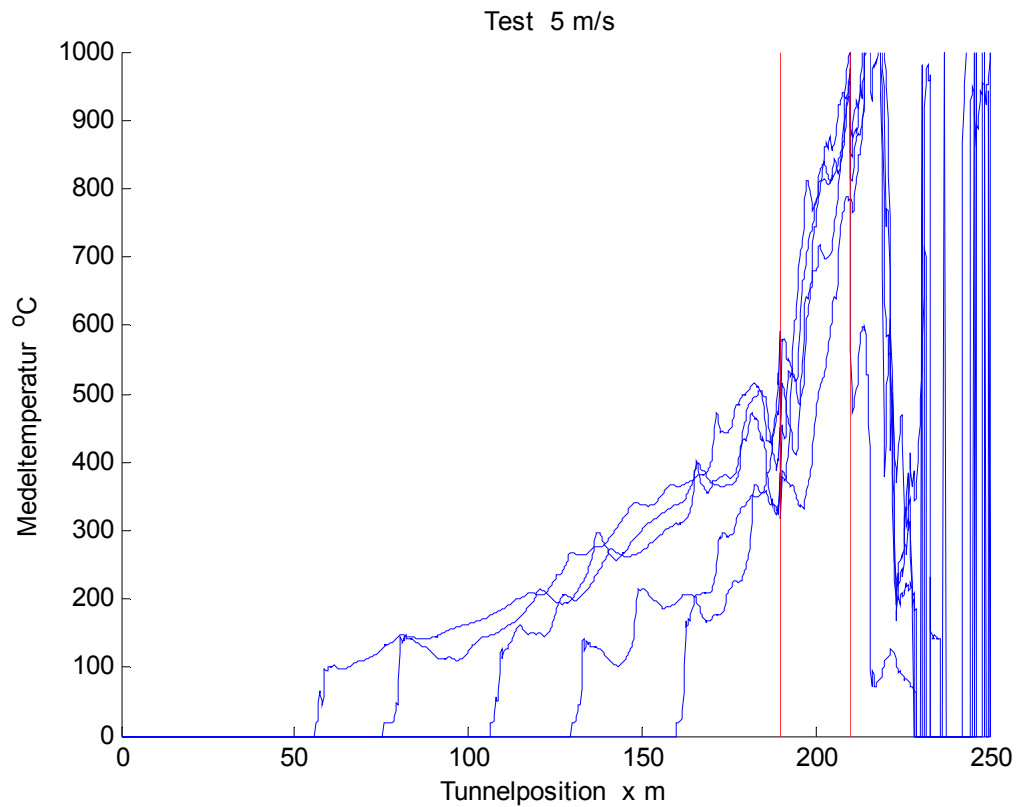
Figur 9.7 Medeltjocklek för brandgaslager i tunneldel vid motströmning 3 m/s.



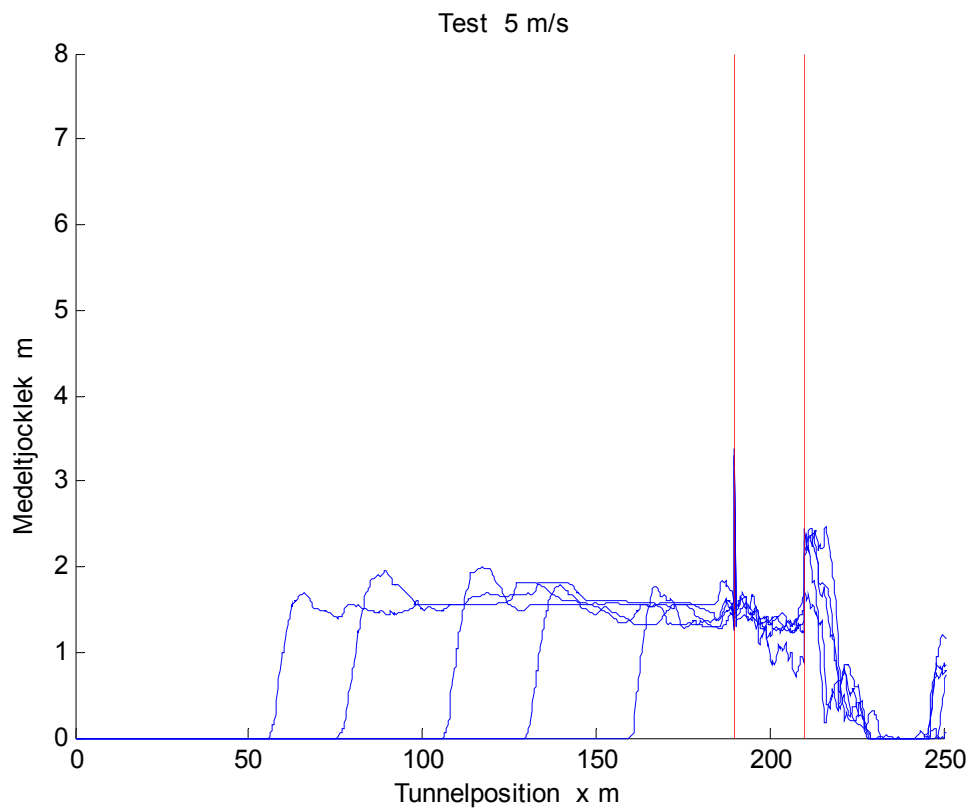
Figur 9.8 Medeltemperatur för brandgaslager i tunneldel vid motströmning vid 4 m/s.



Figur 9.9 Medeltjocklek för brandgaslager i tunneldel vid motströmning 4 m/s.



Figur 9.10 Medeltemperatur för brandgaslager i tunneldel vid motströmning vid 5 m/s.



Figur 9.11 Medeltjocklek för brandgaslager i tunneldel vid motströmning 5 m/s.

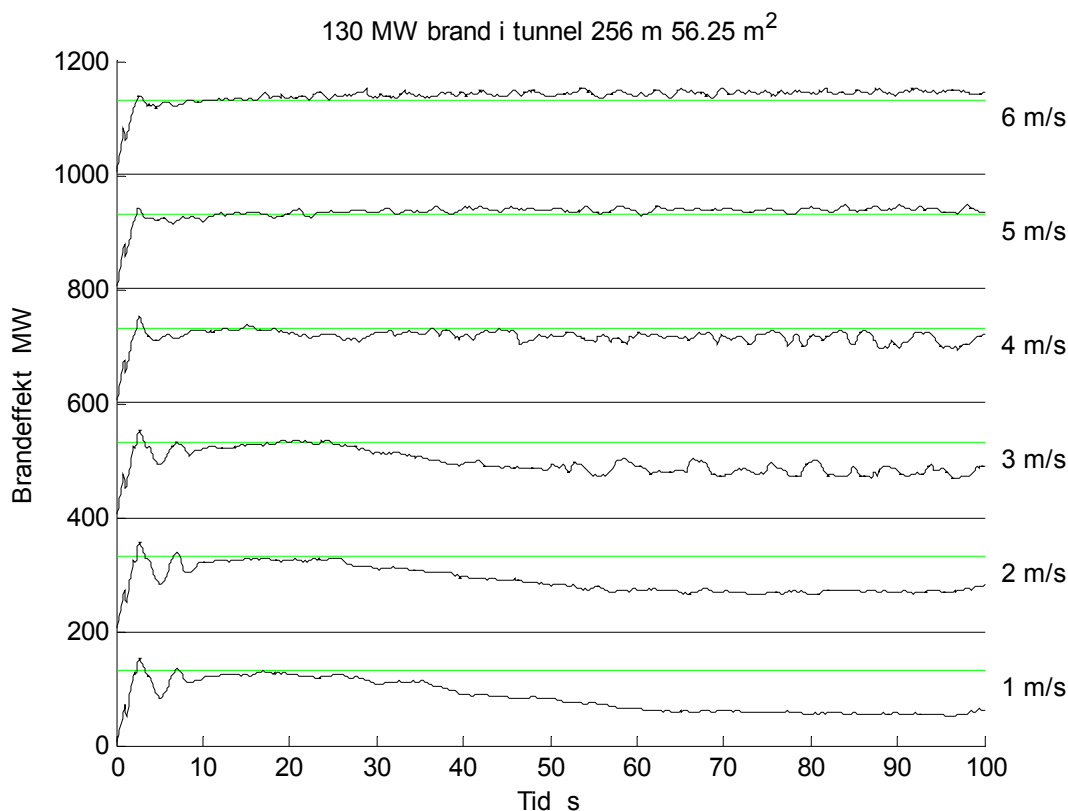
Resultatet för FDS-beräkningar verkar inte stämma överens med det förenklade beräkningsuttrycket (9.1). En förklaring är att beräkningsmodellen med en given utflödeshastighet i tunnelposition x 256 m inte motsvaras av ett lika stort inflöde i tunnelposition x 0 m, eftersom brandeffekten i MW enligt en tumregel skapar ett lika stort brandflöde i m^3/s .

Brandeffekten är nominellt 130 MW. Brandflödet uppskattas till $130 \text{ m}^3/\text{s}$. Detta flöde kan med ett fritt tunneltvärsnitt om 56 m^2 räknas om till hastighet om 2.3 m/s. Värmeförluster till tunnelväggarna minskar dock brandflödet och därmed motsvarande hastighet.

De två påtvingade hastigheterna 1 och 2 m/s innebär därför att branden har ett flöde större än utflödet i tunnelposition x 256 m. Det sker därför även utflöde i tunnelposition x 0 m.

Fallen 3, 4, 5 och 6 m/s med korrektion för brandflödet $130 \text{ m}^3/\text{s}$ motsvarar därför bara 0.7, 1.7, 2.7 respektive 3.7 m/s för hela tunneltvärsnittet och något högre under brandgaslagret.

Både brandgasventilation och brandgaskontroll kan öka brandeffekten genom att branden ventileras bättre. Förbränning av hälften av allt syre för en effekt på 130 MW kräver ett luftflöde om $83 \text{ m}^3/\text{s}$ eller 100 kg/s . Brandeffekten för de sex hastighetsfall redovisas i Figur 9.12 diagramfönster om 0-200 MW för varje fall och med en hjälplinje 130 MW för den nominella brandeffekten. Kurvorna visar att brandeffekten ökar med ökande utströmningshastighet och mer än fördubblas mellan fallen 1-2 m/s och 5-6 m/s. Vilket fall som är värst är dock inte självklart. En fördubblad brandeffekt medför troligen en halverad brandtid.



Figur 9.12 Brandeffekt i tunnel för olika utströmningshastighet från 1 m/s till 6 m/s.

10 Igensättning av tryckutjämningschakt

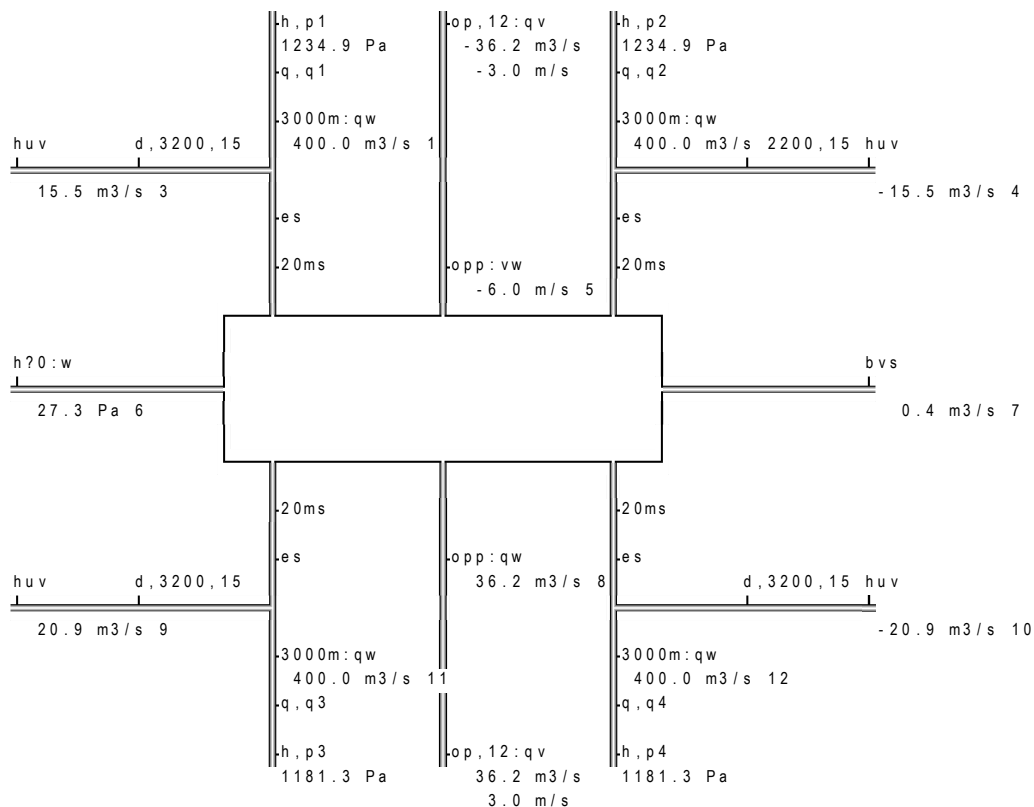
De fyra tryckutjämningschakten har genomgående haft ett engångstryckfall lika med två dynamiska tryck. Igenfrostning kan inträffa och här undersöks med reduktion av den fria ytan till hälften, till en fjärdedel och helt och hållet kombinerat med 6 m² och 12 m² effektiv area för rulltrappssystemen nederst mot perrong. Resultat för fall 0.5 och 6 m² visas nedan med högsta hastighet -18.3 m/s för tågfall 4.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(5)	m/s	0.0	-8.0	7.2	-18.3	-1.3	18.1	-12.5	11.1	-6.0
res(6)	Pa	0.0	48.0	-39.3	251.7	1.3	-245.0	118.1	-92.3	27.3
res(1)	m3/s	0.0	400.0	71.0	400.0	400.0	177.3	400.0	400.0	400.0
res(2)	m3/s	0.0	-79.7	71.0	400.0	-12.9	177.3	400.0	108.8	400.0
res(3)	m3/s	0.0	7.2	21.7	-52.4	22.4	54.3	-30.8	39.0	15.5
res(4)	m3/s	0.0	23.9	-21.7	52.4	3.9	-54.3	30.8	-33.3	-15.5
res(7)	m3/s	0.0	0.5	-0.4	1.1	0.1	-1.0	0.7	-0.6	0.4
res(8)	m3/s	0.0	48.0	-43.4	109.9	7.8	-108.4	75.3	-66.6	36.2
res(9)	m3/s	0.0	-23.9	21.7	-54.7	27.0	59.5	-24.7	42.5	20.9
res(10)	m3/s	0.0	23.9	-34.6	54.7	3.9	-59.5	37.5	-42.5	-20.9
res(11)	m3/s	0.0	79.7	-71.0	182.5	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0
res(12)	m3/s	0.0	79.7	400.0	182.5	12.9	400.0	124.9	400.0	400.0

```

begin
format   o 1 q 1
control  duct=16          con=1      trix=1
set      3000m=d,7000,3000,100  op=t,0.6    huv=e,8:qw
set      20ms=d,7000,20,100    opp=op,6    bvs=t,2000,3:qw  es=e,0

```



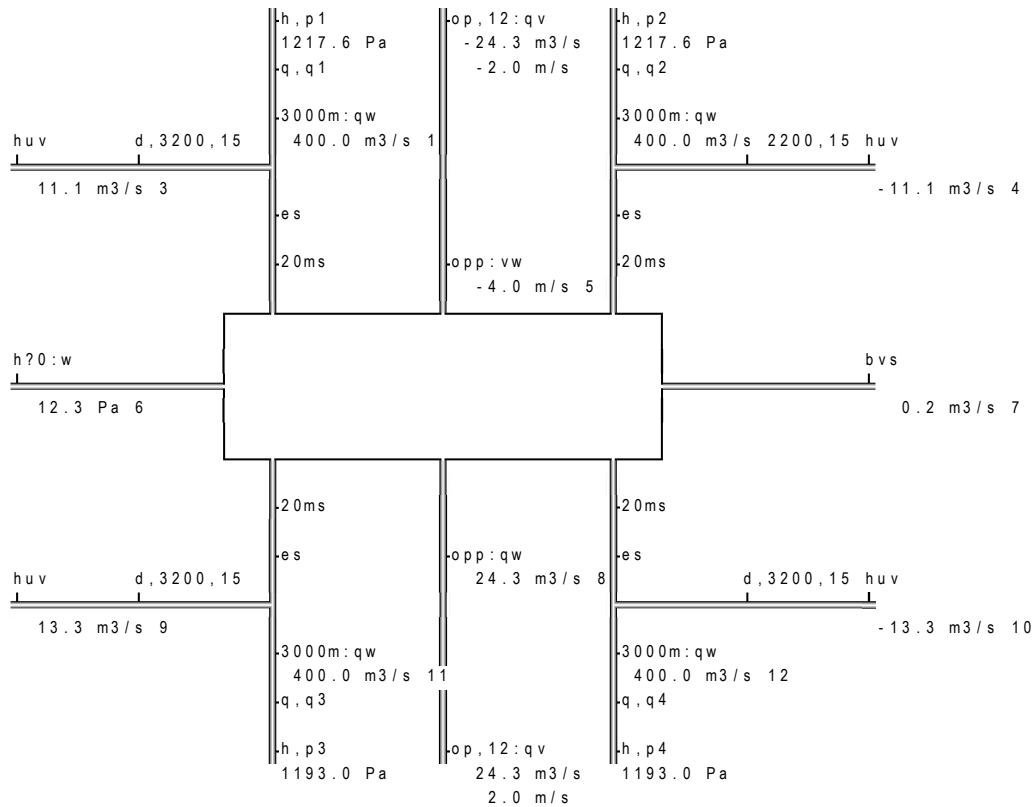
Resultat för fall 0.25 och 6 m² visas nedan med högsta hastighet -21.0 m/s för tågfall 4.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(5)	m/s	0.0	-8.6	8.2	-21.0	-0.8	20.8	-14.6	13.8	-4.0
res(6)	Pa	0.0	55.6	-50.5	331.9	0.5	-325.9	160.1	-142.2	12.3
res(1)	m3/s	0.0	400.0	81.0	400.0	400.0	205.8	400.0	400.0	400.0
res(2)	m3/s	0.0	-85.9	81.0	400.0	-7.7	205.8	400.0	136.0	400.0
res(3)	m3/s	0.0	1.2	13.0	-30.9	12.6	32.9	-19.2	24.5	11.1
res(4)	m3/s	0.0	13.2	-13.0	30.9	1.2	-32.9	19.2	-21.8	-11.1
res(7)	m3/s	0.0	0.5	-0.5	1.2	0.0	-1.2	0.8	-0.8	0.2
res(8)	m3/s	0.0	51.7	-49.2	126.2	4.7	-125.1	87.7	-82.6	24.3
res(9)	m3/s	0.0	-13.2	13.0	-32.2	14.6	35.5	-17.2	25.8	13.3
res(10)	m3/s	0.0	13.2	-19.3	32.2	1.2	-35.5	22.4	-25.8	-13.3
res(11)	m3/s	0.0	85.9	-81.0	210.0	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0
res(12)	m3/s	0.0	85.9	400.0	210.0	7.7	400.0	145.8	400.0	400.0

```

begin
format o 1 q 1
control duct=16 con=1 trix=1
set 3000m=d,7000,3000,100 op=t,0.6 huv=e,32:qw
set 20ms=d,7000,20,100 opp=op,6 bvs=t,2000,3:qw es=e,0

```



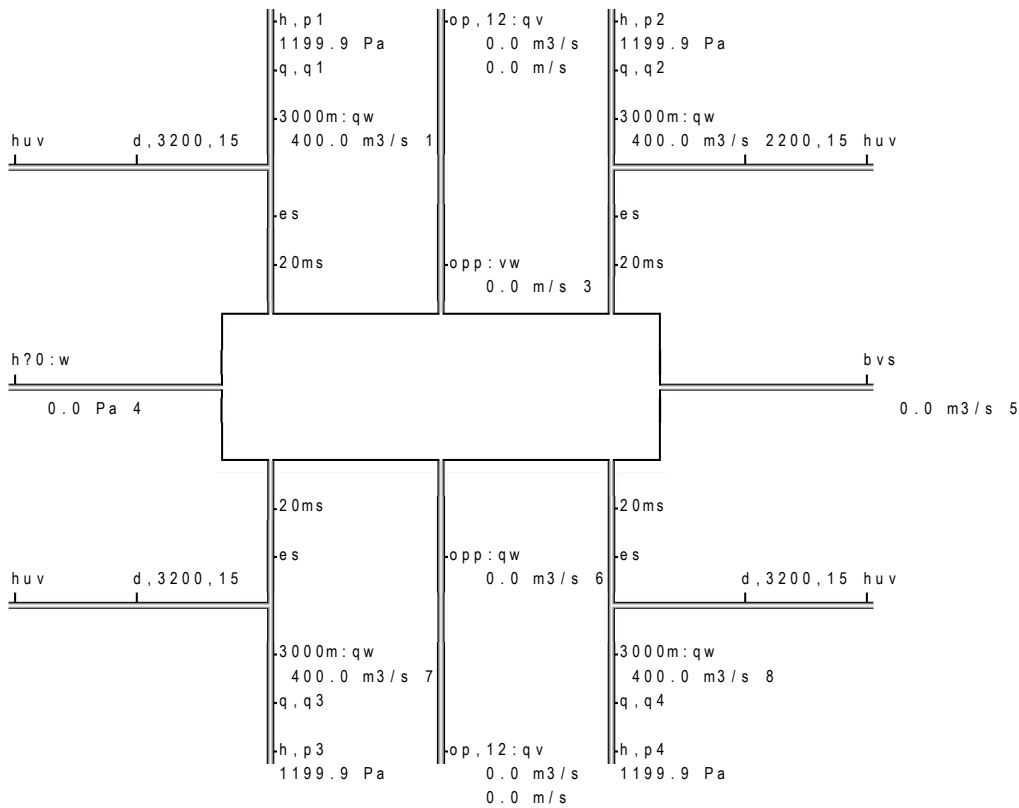
Resultat för fall 0 (slopade tryckutjämningschakt) och 6 m² visas nedan med högsta hastighet -25.0 m/s för tågfall 4.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(3)	m/s	0.0	-9.5	9.5	-25.0	0.0	25.0	-18.1	18.1	0.0
res(4)	Pa	0.0	67.9	-67.9	467.1	0.0	-467.1	246.7	-246.7	0.0
res(1)	m3/s	0.0	400.0	95.1	400.0	400.0	249.5	400.0	400.0	400.0
res(2)	m3/s	0.0	-95.1	95.1	400.0	0.0	249.5	400.0	181.3	400.0
res(5)	m3/s	0.0	0.6	-0.6	1.4	0.0	-1.4	1.1	-1.1	0.0
res(6)	m3/s	0.0	57.1	-57.1	149.7	0.0	-149.7	108.8	-108.8	0.0
res(7)	m3/s	0.0	95.1	-95.1	249.5	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0
res(8)	m3/s	0.0	95.1	400.0	249.5	0.0	400.0	181.3	400.0	400.0

```

begin
format    o 1 q 1
control   duct=16          con=1      trix=1
set       3000m=d,7000,3000,100  op=t,0.6  huv=k,0
set       20ms=d,7000,20,100    opp=op,6  bvs=t,2000,3:qw  es=e,0

```



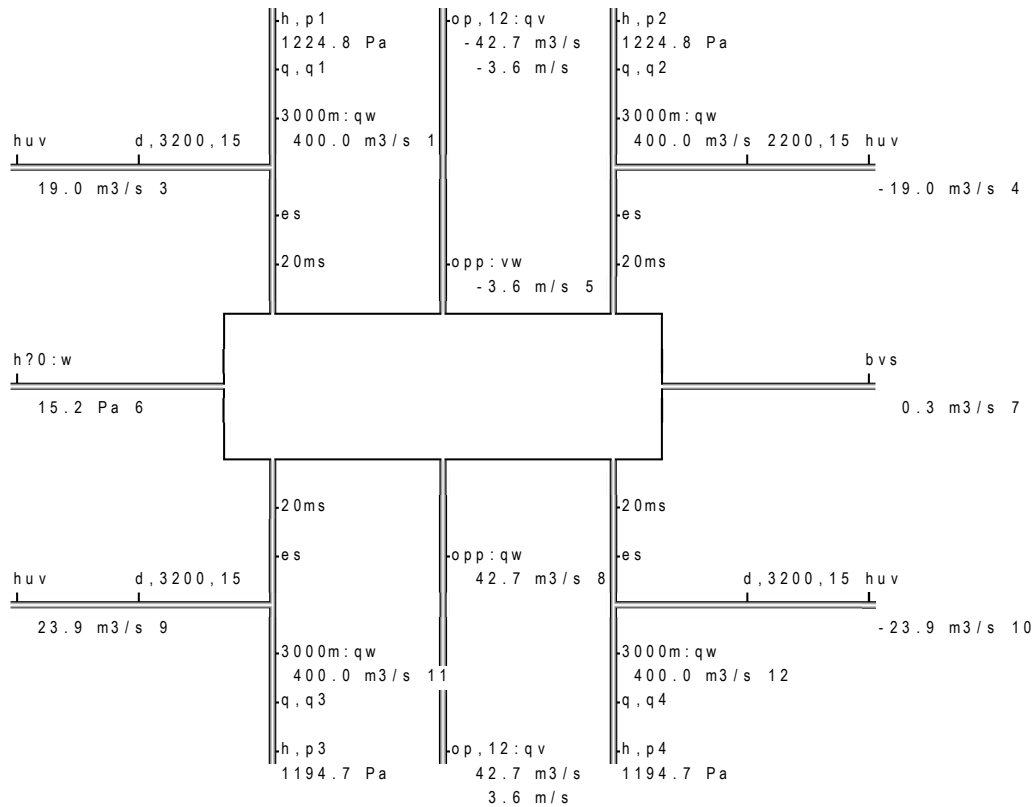
Resultat för fall 0.5 och 12 m² visas nedan med högsta hastighet -12.5 m/s för tågfall 4.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(5)	m/s	0.0	-5.6	5.0	-12.5	-0.9	12.3	-8.5	7.2	-3.6
res(6)	Pa	0.0	38.0	-30.6	188.7	0.9	-181.2	85.9	-61.8	15.2
res(1)	m ³ /s	0.0	400.0	62.6	400.0	400.0	152.5	400.0	400.0	400.0
res(2)	m ³ /s	0.0	-70.8	62.6	400.0	-11.0	152.5	400.0	89.1	400.0
res(3)	m ³ /s	0.0	11.7	19.2	-43.8	22.5	46.7	-22.1	34.4	19.0
res(4)	m ³ /s	0.0	21.3	-19.2	43.8	3.3	-46.7	22.1	-27.3	-19.0
res(7)	m ³ /s	0.0	0.4	-0.4	0.9	0.1	-0.9	0.6	-0.5	0.3
res(8)	m ³ /s	0.0	67.5	-60.6	150.5	10.5	-147.4	101.5	-86.1	42.7
res(9)	m ³ /s	0.0	-21.3	19.2	-47.4	27.0	53.0	-13.6	38.2	23.9
res(10)	m ³ /s	0.0	21.3	-33.1	47.4	3.3	-53.0	32.0	-38.2	-23.9
res(11)	m ³ /s	0.0	70.8	-62.6	157.9	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0
res(12)	m ³ /s	0.0	70.8	400.0	157.9	11.0	400.0	106.6	400.0	400.0

```

begin
format   o 1 q 1
control  duct=16          con=1      trix=1
set      3000m=d,7000,3000,100  op=t,0.6  huv=e,8:qw
set      20ms=d,7000,20,100    opp=op,12  bvs=t,2000,3:qw  es=e,0

```



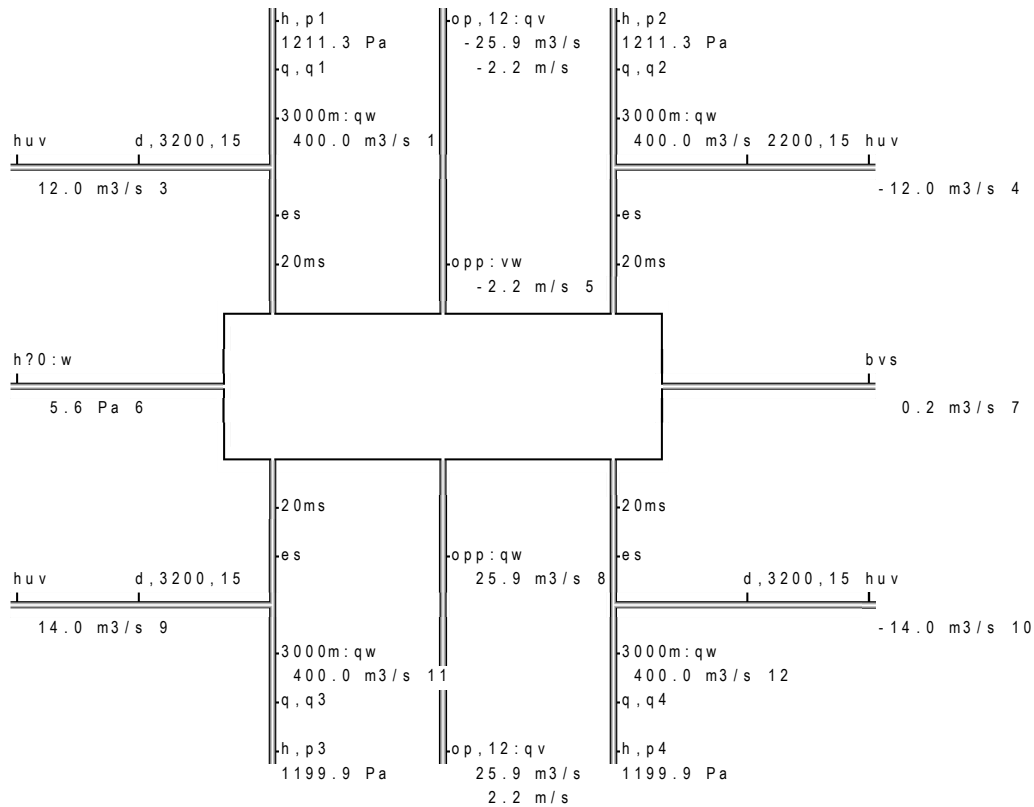
Resultat för fall 0.25 och 12 m² visas nedan med högsta hastighet -14.1 m/s för tågfall 4.

step number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
res(5)	m/s	0.0	-6.0	5.7	-14.1	-0.5	13.9	-9.4	8.7	-2.2
res(6)	Pa	0.0	43.0	-38.3	238.1	0.3	-232.3	105.6	-90.2	5.6
res(1)	m ³ /s	0.0	400.0	70.6	400.0	400.0	173.8	400.0	400.0	400.0
res(2)	m ³ /s	0.0	-75.6	70.6	400.0	-6.4	173.8	400.0	108.3	400.0
res(3)	m ³ /s	0.0	5.8	11.3	-25.3	12.6	27.8	-13.4	20.9	12.0
res(4)	m ³ /s	0.0	11.6	-11.3	25.3	1.0	-27.8	13.4	-17.3	-12.0
res(7)	m ³ /s	0.0	0.4	-0.4	1.0	0.0	-1.0	0.7	-0.6	0.2
res(8)	m ³ /s	0.0	71.9	-67.8	169.0	6.2	-167.0	112.6	-104.0	25.9
res(9)	m ³ /s	0.0	-11.6	11.3	-27.3	14.6	31.0	-10.6	22.4	14.0
res(10)	m ³ /s	0.0	11.6	-18.3	27.3	1.0	-31.0	18.2	-22.4	-14.0
res(11)	m ³ /s	0.0	75.6	-70.6	177.9	400.0	400.0	400.0	400.0	400.0
res(12)	m ³ /s	0.0	75.6	400.0	177.9	6.4	400.0	118.4	400.0	400.0

```

begin
format   o 1 q 1
control  duct=16          con=1      trix=1
set       3000m=d,7000,3000,100  op=t,0.6    huv=e,32:qw
set       20ms=d,7000,20,100    opp=op,12  bvs=t,2000,3:qw  es=e,0

```



Appendix A Tryckutjämningschakt

Nödvändig beskrivningskod för en FDS-modell för undersökning av omblandning av framströmmande brandgaser i en tågtunneldel med ett anslutet tryckutjämningschakt med inflöde redovisas nedan. Modulen är 0.25 m. Simuleringstiden är 25 s.

```
&HEAD CHID='T012001', TITLE=' T 1 m/s 1 m/s 200 C 1 m ' /
```

```
&GRID IBAR=100, JBAR=32, KBAR=32 /
```

```
&PDIM XBAR=25, YBAR=8, ZBAR=8 /
```

```
&TIME TWFIN=25 /
```

```
&PL3D WRITE_XYZ=.TRUE. /
```

```
&MISC DATABASE='c:\nist\fds\database4\database4.data',  
  RADIATION=.FALSE., SURF_DEFAULT='CONCRETE' /
```

```
&OBST XB=0.0,25, 0.00,0.25, 0.00,8.00, SURF_ID='CONCRETE' / sida
```

```
&OBST XB=0.0,25, 7.75,8.00, 0.00,8.00, SURF_ID='CONCRETE' / sida
```

```
&OBST XB=0.0,25, 0.25,7.75, 0.00,0.25, SURF_ID='CONCRETE' / golv
```

```
&OBST XB=0.0,25, 0.25,7.75, 7.75,8.00, SURF_ID='CONCRETE' / tak
```

```
&VENT XB=0.0,0.0, 0.25,7.75, 0.25,7.75, SURF_ID='OPEN' / öppning
```

```
&VENT XB=25,25, 0.25,7.75, 0.25,6.75, SURF_ID='luft' / uteluft
```

```
&SURF ID='luft', VEL=-1, TMPWAL=200 /
```

```
&VENT XB=25,25, 0.25,7.75, 6.75,7.75, SURF_ID='brandgas' / brandgas
```

```
&SURF ID='brandgas', VEL=-1, TMPWAL=200 / brandgas
```

```
&TAIL /
```

Appendix B Brand i tåg tunnel

Nödvändig beskrivningskod för en FDS-modell för undersökning av motströmning av brandgaser i en tåg tunnel del med ett givet utflöde i ena änden redovisas nedan. Modulen är 0.25 m. Simuleringstiden är 100 s. Den specifika brandeffekten är 0.5 MW/m².

&HEAD CHID='tfb051', TITLE=' Tunnel 256 m 8 m 8 m 0.25 m 0.5 MW 1 m/s ' /

&GRID IBAR=1024, JBAR=32, KBAR=32 /

&PDIM XBAR=256, YBAR=8, ZBAR=8 /

&TIME TWFIN=100 /

&MISC DATABASE='c:\nist\fds\database4\database4.data',
RADIATION=.FALSE., SURF_DEFAULT='CONCRETE' /

&OBST XB=0.0,256, 0.00,0.25, 0.00,8.00, SURF_ID='CONCRETE' / sida
&OBST XB=0.0,256, 7.75,8.00, 0.00,8.00, SURF_ID='CONCRETE' / sida
&OBST XB=0.0,256, 0.25,7.75, 0.00,0.25, SURF_ID='CONCRETE' / golv
&OBST XB=0.0,256, 0.25,7.75, 7.75,8.00, SURF_ID='CONCRETE' / tak

&VENT XB=0.0,0.0, 0.25,7.75, 0.25,7.75, SURF_ID='OPEN' / öppning

&VENT XB=256,256, 0.25,7.75, 0.25,7.75, SURF_ID='utlopp' / öppning
&SURF ID='utlopp', VEL=1 / öppning

&SURF ID='brand',HRRPUA=500.0 / 0.5 MW/m2

&OBST XB=190,210, 2.00,6.00, 0.25,4.00,
SURF_IDS='brand','brand','INERT' / brandytor

&TAIL /