LUND UNIVERSITY

Kolmonoxidförgiftning : rättelse och förenklad beräkningsmetod

Jensen, Lars

2009

Link to publication

Citation for published version (APA):
Jensen, L. (2009). *Kolmonoxidförgiftning : rättelse och förenklad beräkningsmetod*. (TVIT; Vol. TVIT-7039). 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

Kolmonoxidförgiftning - Rättelse och förenklad beräkningsmetod

Lars Jensen

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet, 2009
Rapport TVIT--09/7039

Lunds Universitet

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

Avdelningen för installationsteknik

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

Kolmonoxidförgiftning - Rättelse och förenklad beräkningsmetod

Lars Jensen

© Lars Jensen, 2009

ISRN LUTVDG/TVIT--09/7039--SE(57)

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

Innehållsförteckning

1	Inledning	5
2	HbCO-nivåmodell CFK	7
	Implicit modell	7
	Explicit modell	8
	Jämviktssamband	8
	Effekt av kolmonoxidförgiftning	9
	Litteratursökning efter CO-dosen 30000 ppmmin	12
3	HbCO-nivå vid konstant CO-halt	13
4	HbCO-nivå vid avklingande CO-halt	17
5	HbCO-nivå vid linjärt ökande CO-halt	21
6	HbCO-nivå som funktion av luftomsättning	27
7	Förenklad beräkningsmodell	33
	Samband för konstant CO-halt	35
	Samband för avklingande CO-halt	36
	Samband för linjärt ökande CO-halt	37
	Jämförelse mellan exakt och förenklad beräkning	38
	Jämförelse mellan CO-dos och förenklad beräkning	42
8	Olika funktionskrav mot brandgasspridning	45
	Hjälpvariabler och parametrar	45
	Funktionskrav – utspädning	46
	Funktionskrav – nivå	46
	Funktionskrav – siktsträcka	47
	Funktionskrav – temperatur	47
	Funktionskrav – dos	48
	Funktionskrav – kolmonoxidförgiftning	49
	Sammanställning av olika funktionskrav	49
9	Principexempel för FT-system	51
10	Sammanfattning och tillämpning	55
	Referenser	57

1 Inledning

Denna arbetsrapport är en rättelse och vidareutveckling av tre tidigare arbetsrapporter TVIT—07/7010, TVIT—07/7014 och TVIT—08/7025. Kolmoxidförgiftning beräknades med tre antagande enligt nedan. De två första antaganden berör lungornas funktion och kontroll har skett med olika referenser.

- Jämviktssamband mellan blodets HbCO-halt och luftens CO-halt enligt (1.1)
- Fullständig gasupptagning för blodet motsvarar 0.04 av luftens gashalt.
- Fullständig omblandning i den gasvolym som brandgasspridning sker till.

Det antagna jämviktssambandet kan skrivas som:

$$HbCO = CO / (CO + CO_{0.5}) \qquad (-) \qquad (1.1)$$

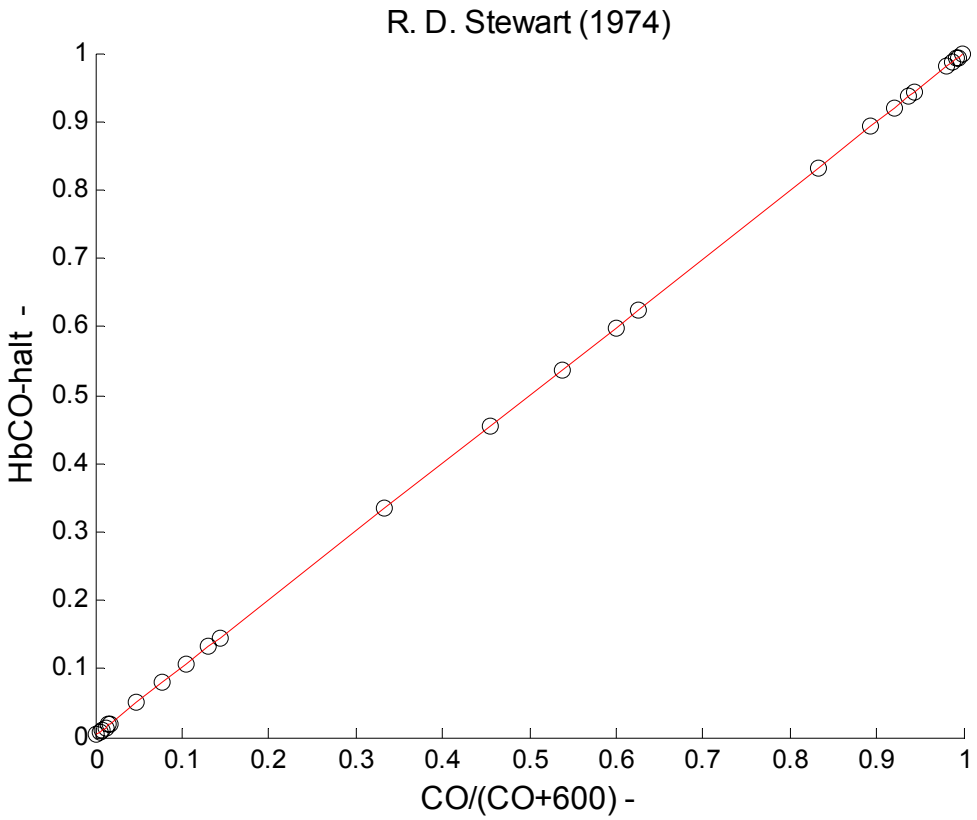
Parametrarna *HbCO, CO* och $CO_{0.5}$ anger kolmonoxidhalt i blodet, i luft och när *HbCO* = 0.5. I en referens R. D. Stewart (1974) finns trettio siffervärden för jämviktstillståndet och CO-halt framräknade för 1, 3, 7, 9, 10, 30, … 900000 ppm. En anpassning av (1.1) till dessa siffer-värden ger $CO_{0.5}$ = 600 ppm, vilket är en liten skillnad mot det tidigare skattade värdet 640 ppm. Resultatet redovisas i Figur 1.1 med angivet HbCO-halt som funktion av beräknad HbCO-halt enligt (1.1). Rotmedelkvadratfelet för skattningarna redovisas i Figur 1.2 som funktion av värdet $CO_{0.5}$.

Det andra antagandet att lungornas gasupptagningsförmåga är 0.04 av luftens gashalt är klart i överkant. Valet av 0.04 gjordes på grundlag av att syreupptagningsförmågan är 0.04 av luftens gashalt. Felet innebär att HbCO-halten överskattas för korta exponeringar, men inte för långvariga exponeringar med jämvikttillstånd.

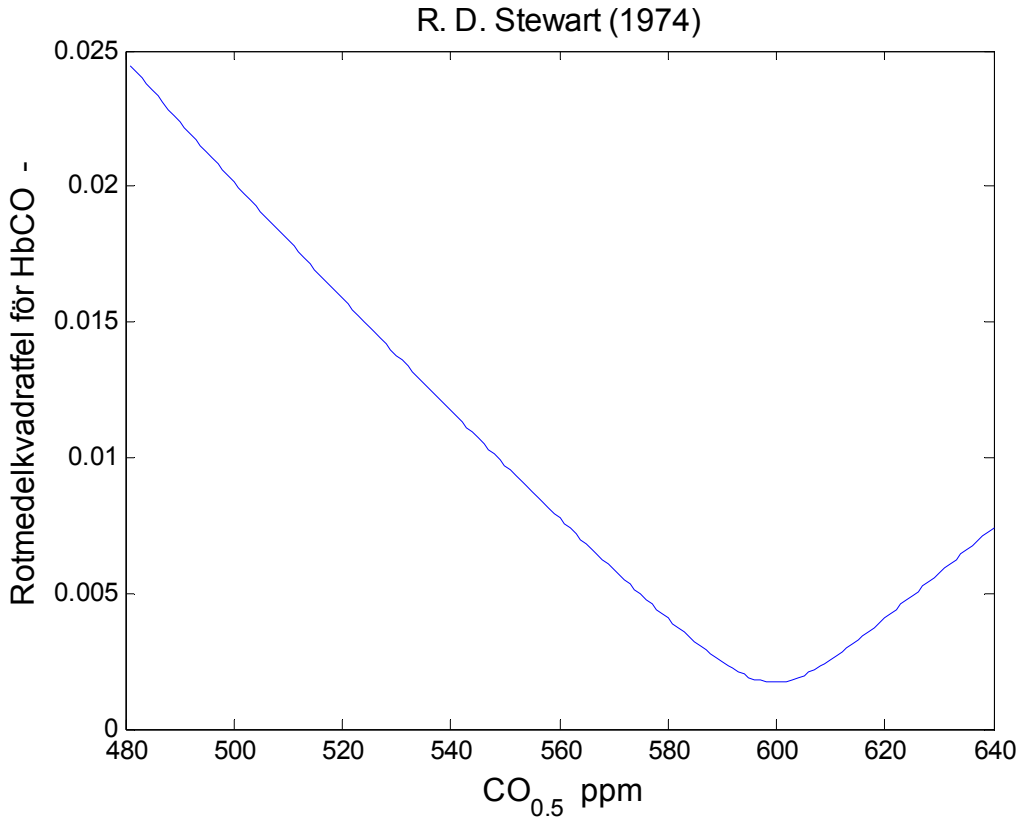
En modell av lungornas kolmonoxidupptagningsförmåga återfinns i referens R. F. Coburn, R. E. Forster och P. B. Kane (1965) och återges i avsnitt 2. Modellsambandet itereras något bakvänt, men kan omformas till en balansekvation för blodets HbCO-halt. Modellen kan förenklas ytterligare till ett explicit beräkningsuttryck, vilket redovisas i avsnitt 7. Förenklingen innebär att lindrig kolmonoxidförgiftning kan beräknas med god noggrannhet för fall med konstant, avklingande eller linjärt ökande CO-halt. Lindrig förgiftning är HbCO-halter < 0.2.

Samma redovisning av HbCO-halt som i TVIT—07/7014 återkommer här rättade i samma avsnitt 3, 4 och 5 för konstant, avklingande respektive linjärt ökande CO-halt. HbCO-halt som funktion av luftomsättning tidigare redovisad i TVIT—08/7025 återfinns rättad här i avsnitt 6. Axlarna för samtliga diagram i avsnitt 3-6 har utökats något mot tidigare redovisning.

Rapporten TVIT—07/7010 behandlar funktionskrav mot brandgasspridning med avseende på giftiga gaser, men andra aspekter är siktförsämring och temperaturökning. En komplettering av funktionskrav mot brandgasspridning redovisas här i avsnitt 8. Några principexempel redovisas i avsnitt 9 med beräknad HbCO-halt eller förgiftningsgrad. En rättelse är att dosen 30000 ppmmin angavs i rapporten TVIT—07/7010 som dödlig, men aktiviteten har betydelse och enligt NFPA Life Safety Code är 30000 ppmmin en hållbar dos.



Figur 1.1 Jämviktssamband mellan HbCO-halt och CO-halt med data enligt R. D. Stewart (1974)



Figur 1.2 Rotmedelkvadratfel för skattning av $CO_{0.5}$ enligt (1.1) med data enligt R. D. Stewart (1974).

2 HbCO-nivåmodell CFK

Implicit modell

Det finns ett beräkningssamband enligt referens R. F. Coburn, R. E. Forster och P. B. Kane (1965) som här benämns CFKs ekvation för att beräkna kolmonoxidförgiftning. Det implicita sambandet återges nedan i nästan originalskick som (2.1) där den sökta storheten *[HbCO]* inte kan lösas ut explicit, eftersom parametern A enligt (2.2) innehåller *[HbCO]*. Sorter för tryck, volym och tid är de samma som i referensen ovan nämligen mmHg, ml respektive min. Några beteckningar har ändrats och alla variabler är kursiva och även hakparenteser har behållits. Index $_a$ och $_b$ står för andningsluft respektive blod.

$$\frac{A[HbCO]_t - Bq_{CO} - P_{COa}}{A[HbCO]_0 - Bq_{CO} - P_{COa}} = exp(-tA/V_bB) \qquad (-) \qquad (2.1)$$

$$A = P_{OOb} / M \, ([Hb] - [HbCO]) \qquad (\text{mm Hg}) \qquad (2.2)$$

$$B = 1 / D_{LCO} + P_L / q_a \qquad (\text{mm Hg min / ml}) \qquad (2.3)$$

D_{LCO}	lungdiffusivitet för CO, CO ml / min mmHg
$[Hbgas]_t$	ml gas / ml blod vid tiden *t*
[Hb]	ml gas totalt / ml blod
M	kvoten mellan blodets affinitet för CO och O_2, -
P_{OOb}	partialtryck för O_2 i lungkapillärer, mmHg
P_{COa}	partialtryck för CO i andningsluft, mmHg
P_L	lufttryck minus ångtryck vid 37 °C, mmHg
q_{CO}	kroppens CO-produktion, CO ml/min
q_a	aveolar andningsflöde, ml/min
t	exponeringstid, min
V_b	blodvolym, ml

Lungdiffusivitet D_{LCO}, andningsflöde q_a och parametern *B* enligt (2.3) beror på aktivitet och i Tabell 2.1 redovisas värden enligt Steinberg, S. och Nielsen, G. D. (1977).

Tabell 2.1 Parametrarna D_{LCO}, q_a och *B* som funktion av aktivitet

aktivitet	aktivitet	D_{LCO}	q_a	*B*
1	vila	30	6000	0.1522
3	lätt arbete	40	18000	0.0646
5	hårt arbete	60	30000	0.0404

Det implicita sambandet enligt (2.1) kan förenklas till nedanstående:

$$x(t) / x(0) = e^{-at} \qquad (-) \qquad (2.4)$$

Explicit samband

Sambandet (2.4) döljer ett fysikaliskt samband som kan fås efter limesövergång, när exponeringstiden *t* går mot noll. Bakom sambandet (2.1) och det förenklade enligt (2.4) ligger en fysikalisk balansekvation i form av en första ordningens differentialekvation på formen:

$$dx/dt = - a\, x(t) \qquad (-) \qquad (2.5)$$

Ekvationen enligt (2.5) har under förutsättning att parametern *a* är en konstant en lösning som kan skrivas som:

$$x(t) = x(0)\, e^{-at} \qquad (-) \qquad (2.6)$$

Termen $A[HbCO]$ i (2.1) är partialtrycket för kolmonoxid i blodet P_{COb} och skrivs som:

$$P_{COb} = P_{OOb}\, [HbCO] / M\, [HbO_2] \qquad (\text{mm Hg}) \qquad (2.7)$$

Blodets syrehalt ges av $[HbO_2]$ och kan beräknas som:

$$[HbO_2] = [Hb] - [HbCO] \qquad (\text{ml } O_2 \text{ / ml blod}) \qquad (2.8)$$

Insättning av (2.7) i (2.1) och omskrivning till modellform enligt (2.5) ger:

$$V_b\, d[HbCO]/dt = (P_{COa} - P_{COb}) / B + q_{CO} \qquad (\text{ml CO}) \qquad (2.9)$$

Sambandet (2.9) är en balansekvation för volymen kolmonoxid i blodet och kan integreras numeriskt med givet startvärde och givna förutsättningar. Startvärdet för $[HbCO]$ är inte noll utan 0.0016 ml CO / ml blod. Orsaken är kroppens produktion av CO, vilket ges av parametern q_{CO}. Följande siffervärden kommer att användas:

D_{LCO}	30 CO ml / min mmHg	
$[Hb]$	0.207 ml O_2 / ml blod	
M	218 -	
P_{OOb}	100 mmHg	
P_L	713 mmHg	
q_{CO}	0.007 CO ml/min	
q_a	6000 ml/min	
V_b	5500 ml	
A	2.216 mm Hg	enligt (2.2)
B	0.152 mm Hg min / ml	enligt (2.3) för q_a 6000 ml/min
B	0.093 mm Hg min / ml	enligt (2.3) för q_a 12000 ml/min

Jämviktssamband

Sambandet (2.9) kan för jämviktsfallet skrivas som följer med utnyttjande av (2.7) och (2.8):

$$P_{COa} + B\, q_{CO} = P_{OOb}\, [HbCO] / M\, ([Hb] - [HbCO]) \quad (\text{mm Hg}) \qquad (2.10)$$

Graden av kolmonoxidförgiftning avges med andelen *[HbCO]* utav *[Hb]*, vilket i fortsättningen anges som *HbCO* lika med kvoten *[HbCO]* / *[Hb]*. Omskrivning av (2.10) för att lösa ut *HbCO* och införandet av $CO = P_{COa} / P_L$ och hjälpvariabeln *c* ger följande:

$$HbCO = c / (1+c) \qquad (-) \qquad (2.11)$$

där

$$c = M (CO\ P_L + B\ q_{CO}) / P_{OOb} \qquad (-) \qquad (2.12)$$

Uttrycket (2.11) identiskt med (1.1) om $q_{CO} = 0$ och $CO_{0.5}$ enligt (1.1) beräknas som:

$$CO_{0.5} = P_{OOb} / M\ P_L \qquad (-) \qquad (2.13)$$

Effekt av kolmonoxidförgiftning

Detta underavsnitt har tidigare redovisats i arbetsrapport TVIT—07/7014. Beräknad HbCO-halt för en given CO-exponering och angivna symptom för data från referenserna 1 Ondrus (1990), 2 SPFE Handbook of Fire Protection Enginnering (1994), 3 Fire engineering guidelines (1995) och 4 Quintiere (1997) redovisade i Tabell 2.2 stämde dåligt överens. Orsaken var den överskattade HbCO-nivån.

Tabell 2.2 Sammanställning mellan CO-dos och verkan enligt referenser 1-4

fall	CO-halt ppm	exponeringstid	CO-dos ppmmin	verkan	referens
1	100	8 h	48000	-	1
2	400-500	60 min	24000-30000	ingen märkbar effekt	1
3	600-700	60 min	36000-42000	just märkbar effekt	1
4	1000-1200	60 min	60000-72000	obehag	1
5	1500-2000	60 min	90000-120000	farlig	1
6	3000	30 min	90000	farlig	1
7	10000	1 min	10000	dödlig	1
8	6000-8000	5 min	30000-40000	hjälplös, oförmögen	2-4
9	12000-16000	5 min	60000-80000	dödlig	2-4
10	1400-1700	30 min	42000-51000	hjälplös, oförmögen	2-4
11	2500-4000	30 min	75000-120000	dödlig	2-4

Ovanstående sifferuppgifter i Tabell 2.1 är långt ifrån samstämmiga. Fall 7 ligger långt under fall 9 både vad gäller nivå och dos. Fall 7 avser kanske räddningsarbete, vilket ökar CO-upptagningen med en faktor 3, vilket i sin tur räknar upp dosen till 30 000 ppmmin. Detta gäller även fall 6 jämfört med fall 11.

HbCO-halten har beräknats för fall 1-11 i Tabell 2.2 för att jämföra med de tre gränserna 0.2, 0.4 och 0.6 som skiljer lindrig, måttlig, allvarlig och dödlig kolmonoxidförgiftning åt. Resultatet redovisas i Tabell 2.3 för undre gränsvärden och i Tabell 2.4 för övre gränsvärden. Jämförelse sker även med CO-dosen 30000 ppmmin, vilken i litteraturen anges som hållbar. Kvoten mellan beräknad HbCO-nivå och jämviktsnivån vid oändlig exponering redovisas också för att visa om jämviktstillståndet uppnåtts eller inte.

Tabell 2.3 Beräknad HbCO-halt och relativ CO-dos för Tabell 2.2 för undre gränsvärden

fall	Tabell 2.2 verkan	HbCO verkan	CO_{dos} /30000	HbCO	$HbCO_\infty$	HbCO /$HbCO_\infty$
1	-	lindrig	1.60	0.11	0.14	0.76
2	ingen märkbar	lindrig	0.80	0.09	0.40	0.23
3	just märkbar	lindrig	1.20	0.14	0.50	0.27
4	obehag	måttlig	2.00	0.23	0.63	0.36
5	farlig	måttlig	3.00	0.33	0.71	0.47
6	farlig	måttlig	3.00	0.35	0.83	0.42
7	dödlig	lindrig	0.33	0.04	0.94	0.04
8	hjälplös	lindrig	1.00	0.12	0.91	0.13
9	dödlig	måttlig	2.00	0.25	0.95	0.26
10	hjälplös	lindrig	1.40	0.17	0.70	0.24
11	dödlig	måttlig	2.50	0.29	0.81	0.36

Tabell 2.4 Beräknad HbCO-halt och relativ CO-dos för Tabell 2.2 för övre gränsvärden

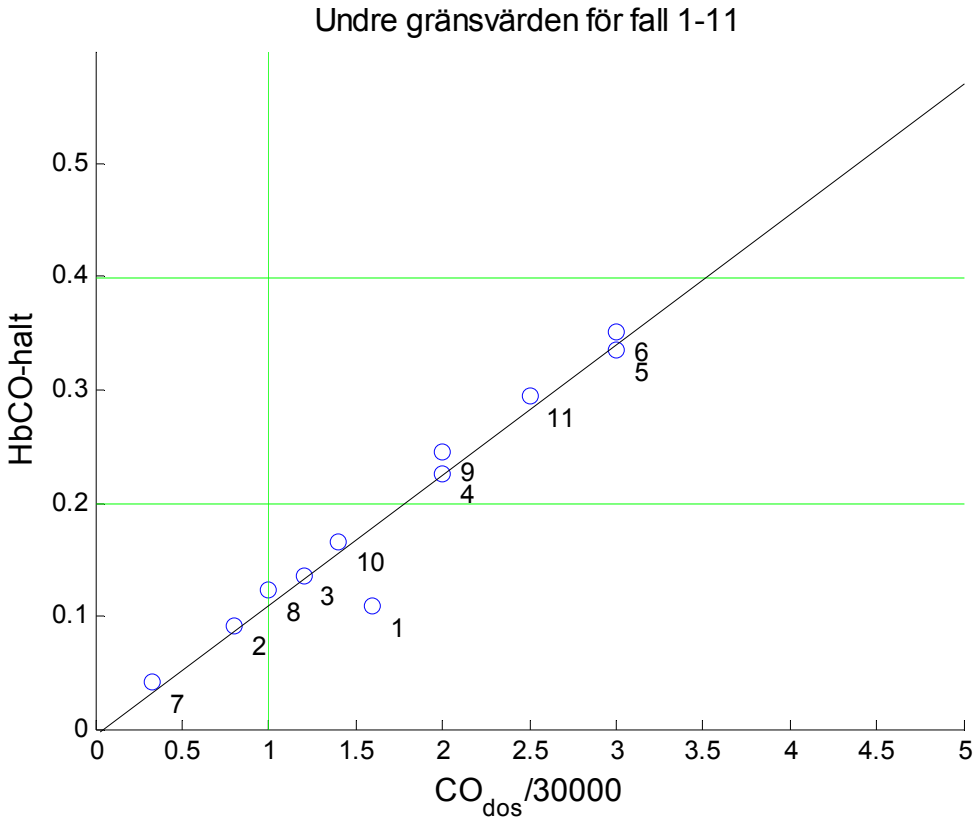
fall	Tabell 2.2 verkan	HbCO verkan	CO_{dos} /30000	HbCO	$HbCO_\infty$	HbCO /$HbCO_\infty$
1	-	lindrig	1.60	0.11	0.14	0.76
2	ingen märkbar	lindrig	1.00	0.11	0.45	0.25
3	just märkbar	lindrig	1.40	0.16	0.54	0.29
4	obehag	måttlig	2.40	0.27	0.67	0.40
5	farlig	allvarig	4.00	0.44	0.77	0.57
6	farlig	måttlig	3.00	0.35	0.83	0.42
7	dödlig	lindrig	0.33	0.04	0.94	0.04
8	hjälplös	lindrig	1.33	0.16	0.93	0.18
9	dödlig	måttlig	2.67	0.33	0.96	0.34
10	hjälplös	lindrig	1.70	0.20	0.74	0.27
11	dödlig	allvarig	4.00	0.47	0.87	0.54

För att underlätta analysen redovisas beräknad HbCO-halt som funktion kvoten mellan CO-dos och 30000 ppmmin med undre gränsvärdena i Figur 2.1 och övre gränsvärden i Figur 2.2. Linjär regression mellan HbCO-halt och relativ CO-dos ger de två sambanden:

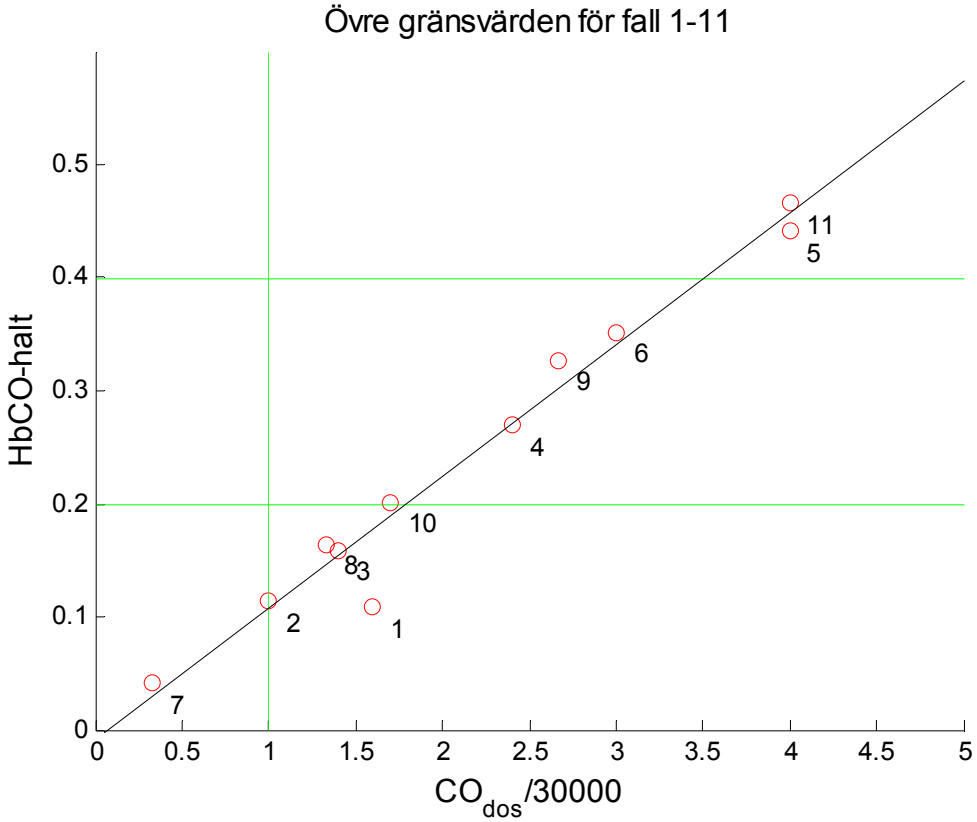
$$HbCO = 0.1154\ (CO_{dos}/30000) - 0.0052 \qquad \text{(undre gränsvärden)}$$

$$HbCO = 0.1162\ (CO_{dos}/30000) - 0.0076 \qquad \text{(övre gränsvärden)}$$

Beräknade värden i både Figur 2.1 och 2.2 visar att det finns ett klart samband mellan beräknad HbCO-halt och beräknad CO-dos. CO-dosen 30000 ppmmin motsvarar enligt Figur 2.1 och 2.2 bara en HbCO-halt omkring 0.1 (0.1102 och 0.1084 enligt regression ovan), vilket innebär lindrig verkan och är långt från dödlig verkan. Dessa två slutsatser kunde inte dras med de tidigare överskattande beräkningar redovisade i TVIT—7/7014. Beräkningarna avser ett andningsflöde om 6 l/min, vilket motsvarar en person i vila.



Figur 2.1 Kolmonoxidförgiftning som funktion av relativ CO-dos enligt Tabell 2.3.



Figur 2.2 Kolmonoxidförgiftning som funktion av relativ CO-dos enligt Tabell 2.4.

Fall 2 anger ingen märkbar effekt och HbCO-halten klassas som lindriga symptom.

Fall 3 anger just märkbar effekt och HbCO-halten anger lindriga symptom.

Fall 4 anger obehag och HbCO-halten motsvarar måttliga symptom.

Fall 5 och 6 anger farlig verkan och HbCO-halten anger måttliga till allvarliga symptom.

Fall 7 med CO-halt 10000 ppm och exponeringstid 1 min anges som dödlig, medan HbCO-halten anger endast lindrig verkan. CO-dosen är 10000 ppmmin. En förklaring är att blodflödet från lungorna till hjärtat blir starkt förgiftat och att hjärtats funktion upphör. Två eller tre andetag med CO-halten 12800 ppm kan medföra medvetslöshet enligt SPC (2008).

En kommentar är att modellen betraktar hela blodvolymen som fullständigt omblandad med samma HbCO-halt, men blodvolymen borde egentligen delas upp i två volymer. En mindre volym finns mellan hjärta-lungor-hjärta och en större volym mellan hjärta-kroppen-hjärta. Det bör därför vara möjligt att snabbt förgifta den mindre blodvolymen och därmed slå ut hjärtats funktion utan att den större blodvolymen hinner påverkas lika mycket.

Fall 8 till 10 anger hjälplös, medan HbCO-halten klassas som lindriga.

Fall 9 och 11 anges som dödliga och HbCO-halt anger med måttliga och allvarliga symptom.

De flesta av de elva fallen ligger klart under sina jämviktshalter. Kvoten mellan beräknad HbCO-halt och jämviktshalt är för övre gränsvärden för fall 1, 5 och 11 > 0.5. HbCO-halten behöver inte heller vara > 0.5 utan 0.25 kan vara tillräckligt enligt Nelson (1998).

Något som inte framgår av sammanställningen är att aktiviteten och det därtill kopplade andningsflödet har mycket stor betydelse. Andningen bestämmer bland annat hur mycket kolmonoxid som kan tas upp av blodet. Aktiviteterna sittande, gående och arbetande förhåller sig som 1:2:3. Aktiviteten bestämmer indirekt parametern *B* enligt Tabell 2.1 och tidsförloppet för HbCO-halten enligt sambandet (2.9).

Litteratursökning efter CO-dos 30000 ppmmin

Dosen 30000 ppmmin angavs i arbetsrapporten TVIT—07/7010 som dödlig. Detta är felaktigt, eftersom kroppsstorlek och aktiviteten har betydelse. En mindre sökning har skett med Google med sökorden: 30000 ppmmin carbon monoxide. Detta gav 145 träffar. Krav på dosen 30000 ppmmin (integrerad utan krav på högsta värde) hittades i referens Milke m fl (2005) med hänvisning till NFPA 101 Life Safety Code (2003). Dosen angavs för att vara hållbar (tenable), vilket kan tolkas som en tillåten CO-dos. Det angavs också en hållbar gräns för CO på 800 ppm för utrymning under 30 min, vilket ger CO-dosen 24000 ppmmin. Enligt NFPA 5000 (2002) som behandlar utrymning anges 30000 ppmmin som hållbart.

Referens SPC (2008) anger att som en tumregel att en CO-dos över 30000 ppm är troligen farlig, men inte dödlig.

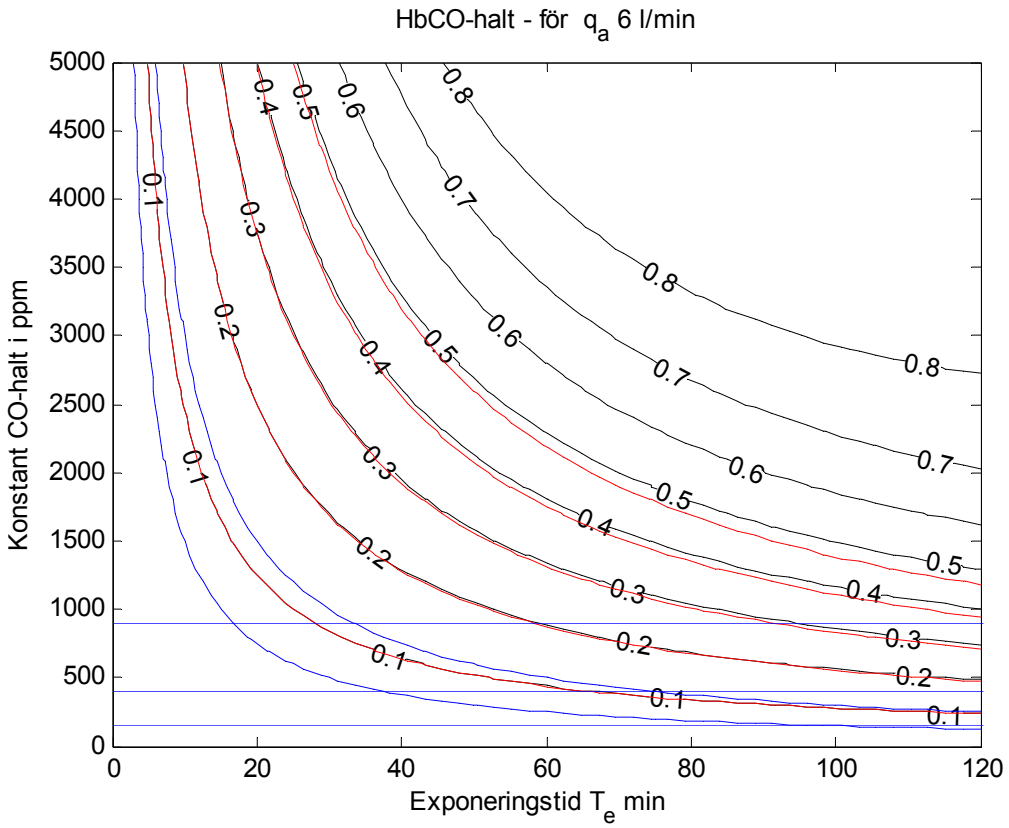
3 HbCO-nivå vid konstant CO-halt

Hur HbCO-halten beror på exponeringstiden vid konstant CO-halt redovisas i Figur 3.1-6 med isolinjer för HbCO-halt med exponeringstid som x-axel och CO-halt som y-axel för andnings-flödet 6 och 12 l/min och HbCO-startvärden 0.0, 0.2 och 0.4. HbCO-startvärden skilda från noll kan användas för hur HbCO-halten avtar efter förgiftning. Kurvor för CO-dosen 15000 och 30000 ppmmin och linjer för CO-halter 150, 400 och 900 ppm motsvarande HbCO-jäm-viktshalter 0.2, 0.4 och 0.6 återfinns också i Figur 3.1-6. Isolinjer redovisas även för en förenklad beräkningsmetod för HbCO-halter upptill 0.5, som överskattas obetydligt för låga HbCO-halter. Den förenklade beräkningsmetoden beskrivs i avsnitt 7.

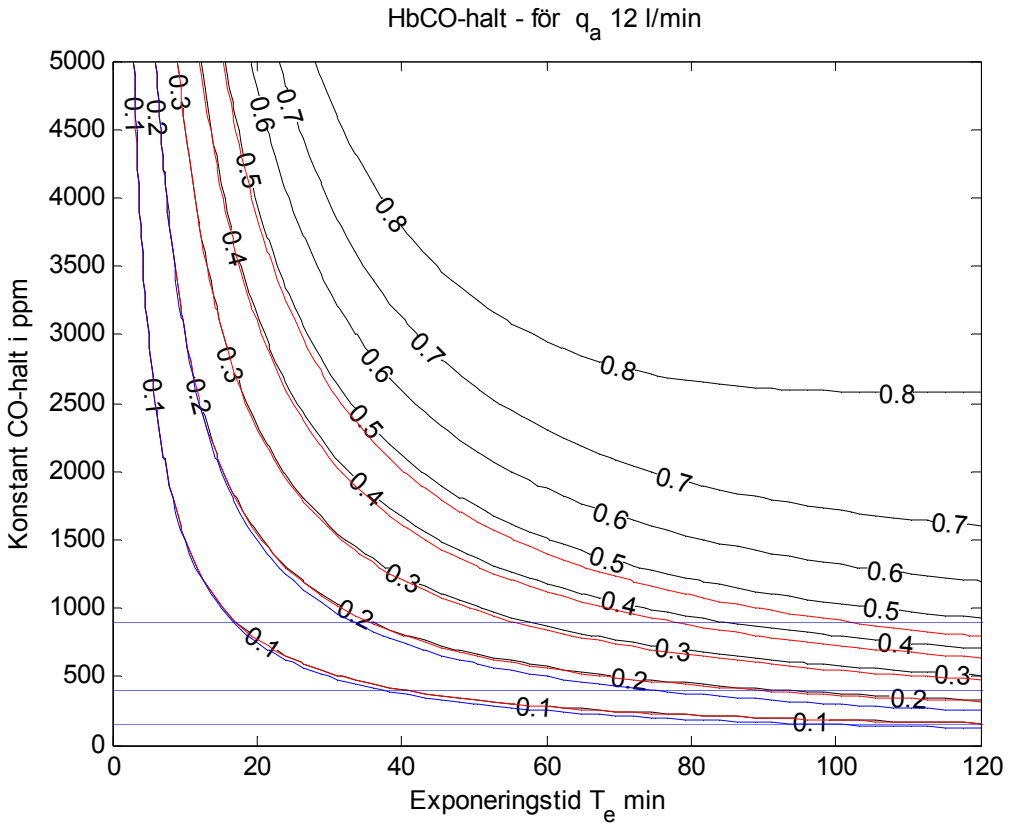
Fyra enskilda värden redovisas för kombination i Tabell 3.1 med avläsningar för exponerings-tiderna 30 och 60 min och CO-halterna 500 och 1000 ppm. CO-dosen redovisas normaliserad mot 30000 ppmmin. En enkel jämförelse med kvoten mellan HbCO-halten och CO-dosen som 2 HbCO/(CO_{dos}/30000) visar att CO-dosen 30000 ppmmin överskattar ett farligt HbCO-värde 0.5. Siffervärdena i Tabell 3.1 för HbCO-startvärdet 0 är omkring 0.24 för det lägre andningsflödet och 0.36 för det högre andningsflödet.

Tabell 3.1 Indata och resultat för simuleringsfall med konstant CO-halt.

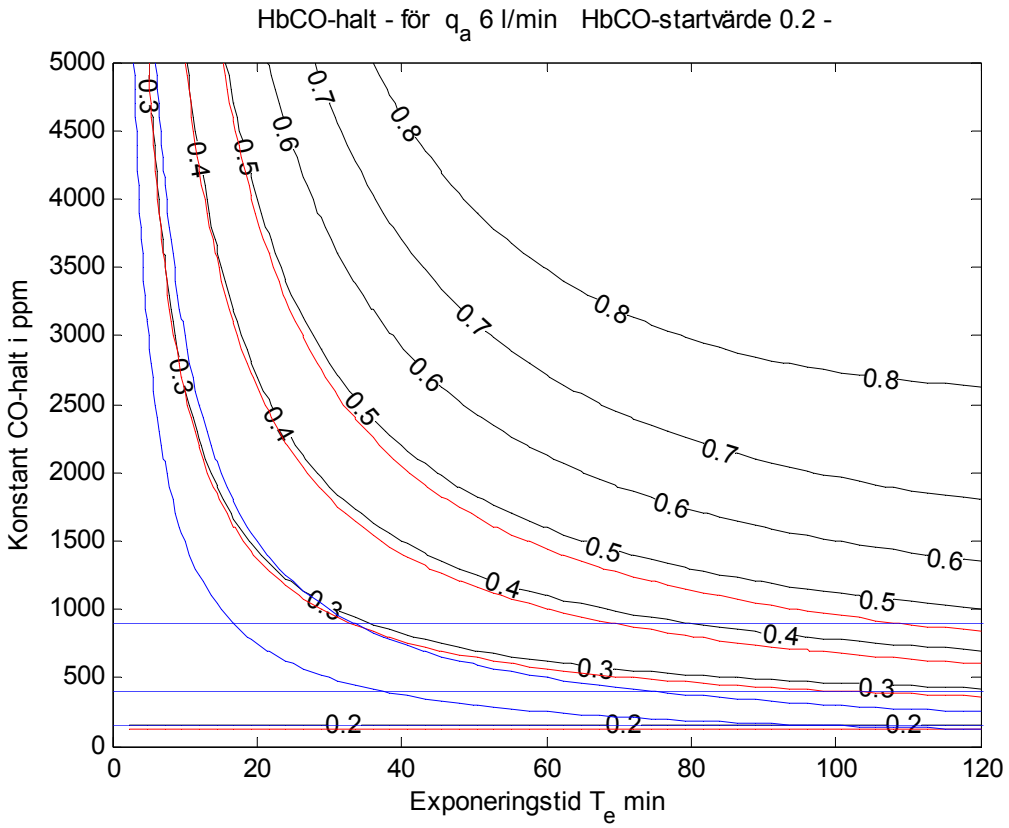
q_a l/min	T_e min	CO ppm	$HbCO_0$	HbCO	CO_{dos}/3e4	2·(5)/(6)	Figur
6	30	500	0.0	0.059	0.500	0.238	3.1
6	60	500	0.0	0.114	1.000	0.227	3.1
6	30	1000	0.0	0.118	1.000	0.237	3.1
6	60	1000	0.0	0.225	2.000	0.225	3.1
12	30	500	0.0	0.095	0.500	0.379	3.2
12	60	500	0.0	0.176	1.000	0.351	3.2
12	30	1000	0.0	0.188	1.000	0.377	3.2
12	60	1000	0.0	0.343	2.000	0.343	3.2
6	30	500	0.2	0.239	0.500	0.958	3.3
6	60	500	0.2	0.274	1.000	0.548	3.3
6	30	1000	0.2	0.297	1.000	0.594	3.3
6	60	1000	0.2	0.380	2.000	0.380	3.3
12	30	500	0.2	0.262	0.500	1.048	3.4
12	60	500	0.2	0.311	1.000	0.622	3.4
12	30	1000	0.2	0.352	1.000	0.703	3.4
12	60	1000	0.2	0.463	2.000	0.463	3.4
6	30	500	0.4	0.408	0.500	1.632	3.5
6	60	500	0.4	0.414	1.000	0.829	3.5
6	30	1000	0.4	0.463	1.000	0.926	3.5
6	60	1000	0.4	0.511	2.000	0.511	3.5
12	30	500	0.4	0.412	0.500	1.649	3.6
12	60	500	0.4	0.421	1.000	0.841	3.6
12	30	1000	0.4	0.495	1.000	0.990	3.6
12	60	1000	0.4	0.553	2.000	0.553	3.6



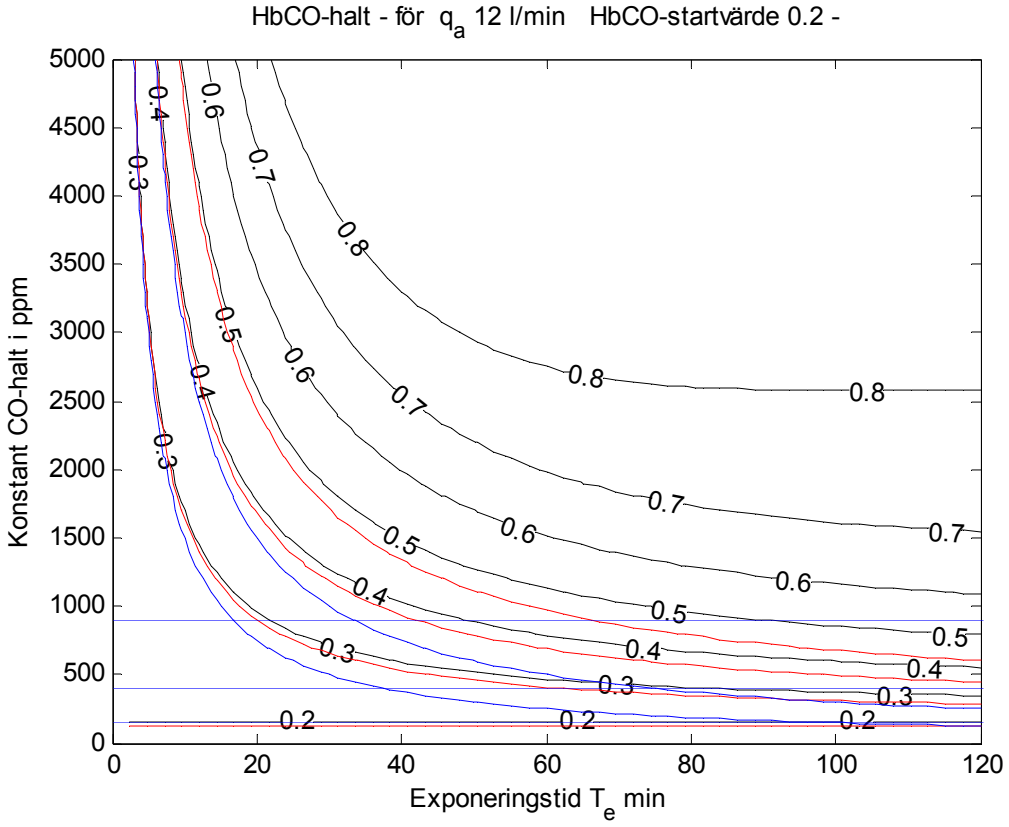
Figur 3.1 HbCO-halt för startvärde 0 och konstant CO-halt och q_a = 6 l/min.



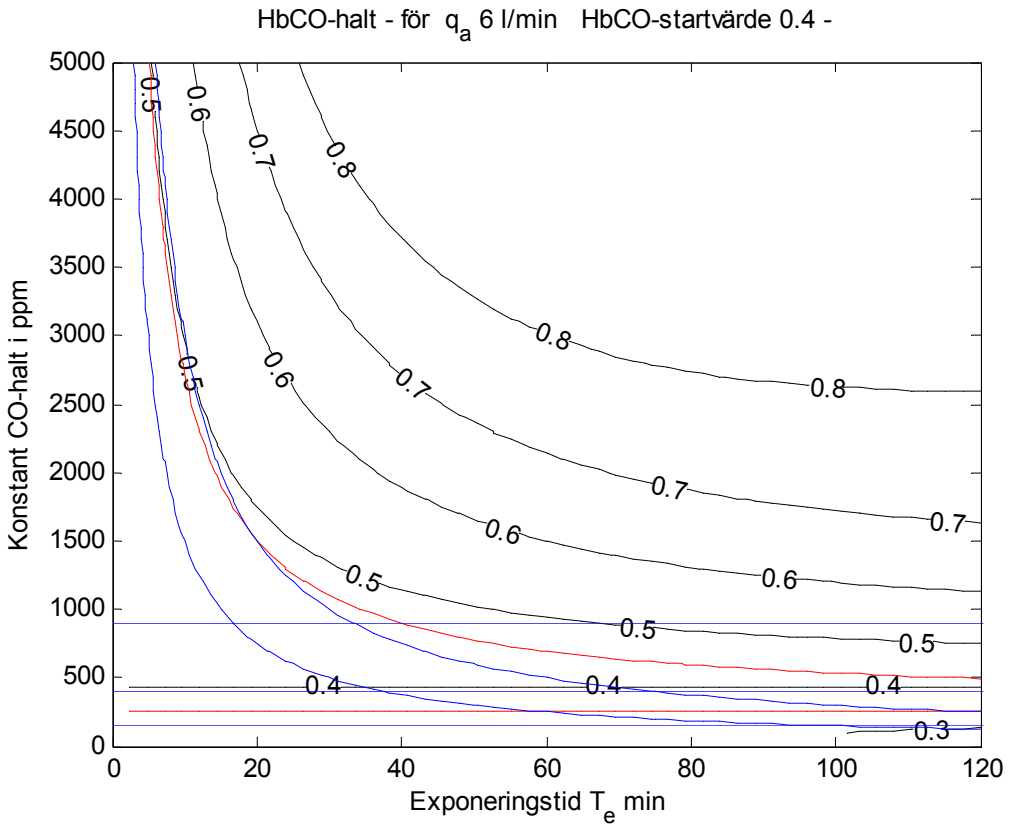
Figur 3.2 HbCO-halt för startvärde 0 och konstant CO-halt och q_a = 12 l/min.



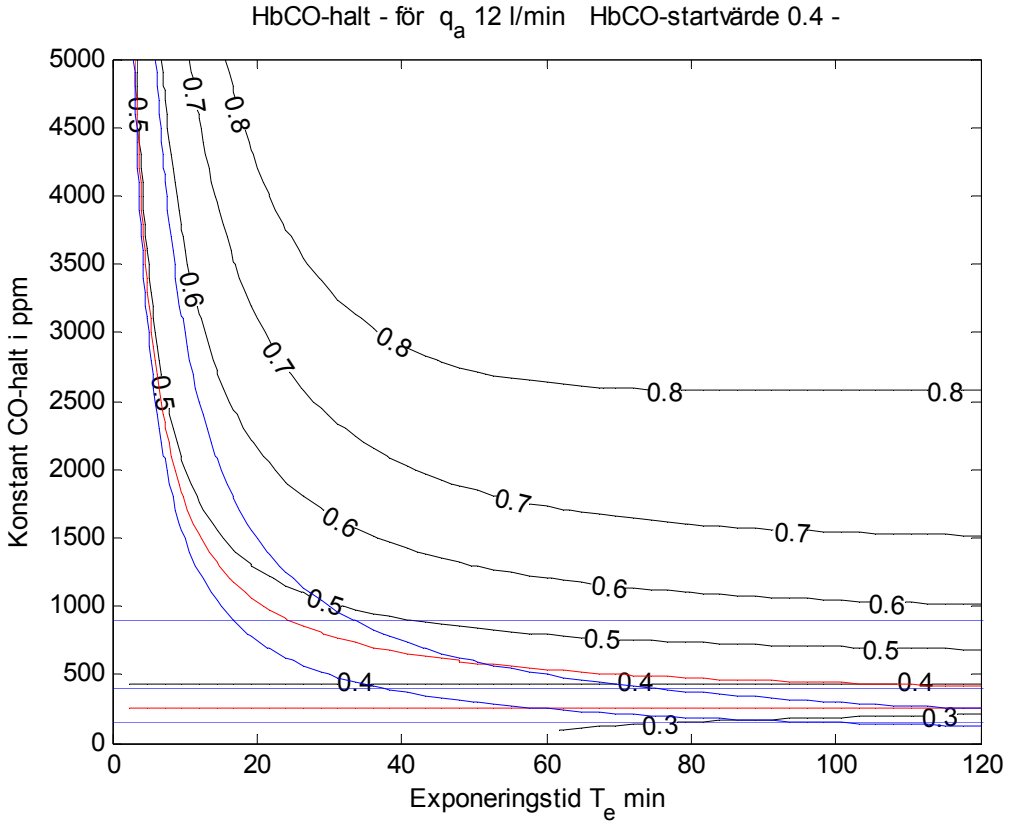
Figur 3.3 HbCO-halt för startvärde 0.2 och konstant CO-halt och q_a = 6 l/min.



Figur 3.4 HbCO-halt för startvärde 0.2 och konstant CO-halt och q_a = 12 l/min.



Figur 3.5 HbCO-halt för startvärde 0.4 och konstant CO-halt och q_a = 6 l/min.



Figur 3.6 HbCO-halt för startvärde 0.4 och konstant CO-halt och q_a = 12 l/min.

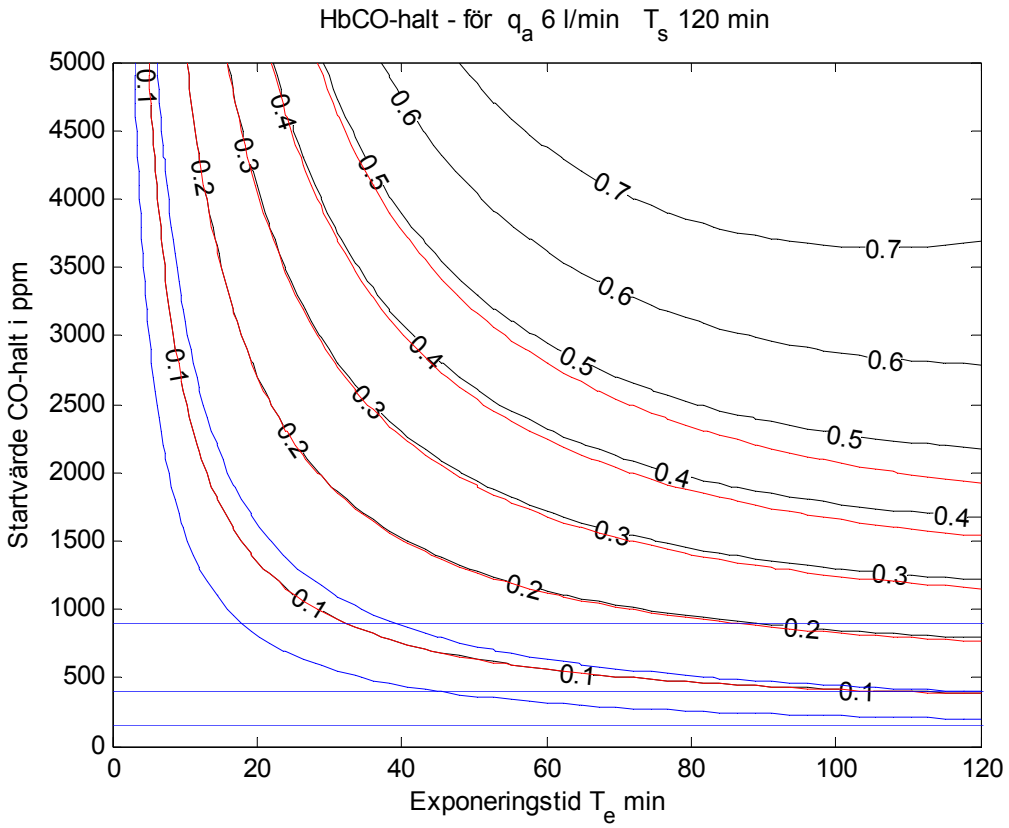
4 HbCO-nivå vid avklingande CO-halt

Hur HbCO-halten beror på exponeringstiden vid exponentiellt avtagande CO-halt under utvädringsfasen efter spridningsfasen redovisas i Figur 4.1-6 för andningsflödet 6 och 12 l/min och ventilationen med omsättningstiderna 120, 60 och 30 min. Kurvor för CO-dosen 15000 och 30000 ppmmin och linjer för CO-halter 150, 400 och 900 ppm motsvarande HbCO-jämviktshalt 0.2, 0.4 och 0.6 återfinns också i Figur 4.1-6. Isolinjer redovisas även för en förenklad beräkningsmetod för HbCO-halter upptill 0.5, som överskattas obetydligt för låga HbCO-halter. Den förenklade beräkningsmetoden beskrivs i avsnitt 7.

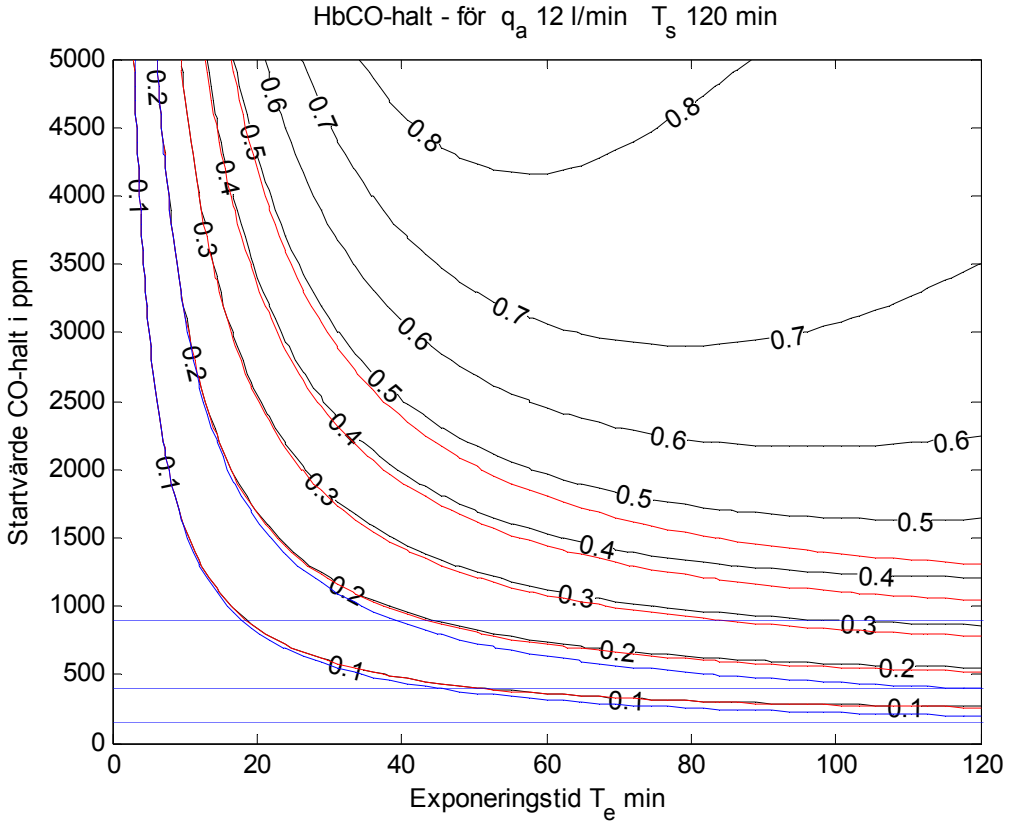
Fyra enskilda värden redovisas för varje kombination i Tabell 4.1 med avläsningar för exponeringstiderna 30 och 60 min och CO-halterna 500 och 1000 ppm. CO-dosen redovisas normaliserad mot 30000 ppmmin. En enkel jämförelse med kvoten mellan HbCO-halten och CO-dosen som 2 HbCO/(CO_{dos}/30000) visar att CO-dosen 30000 ppmmin överskattar ett farligt HbCO-värde 0.5. Siffervärdena i Tabell 4.1 är omkring 0.24 för det lägre andnings-flödet och 0.36 för det högre andningsflödet.

Tabell 4.1 Indata och resultat för simuleringsfall med avklingande CO-halt.

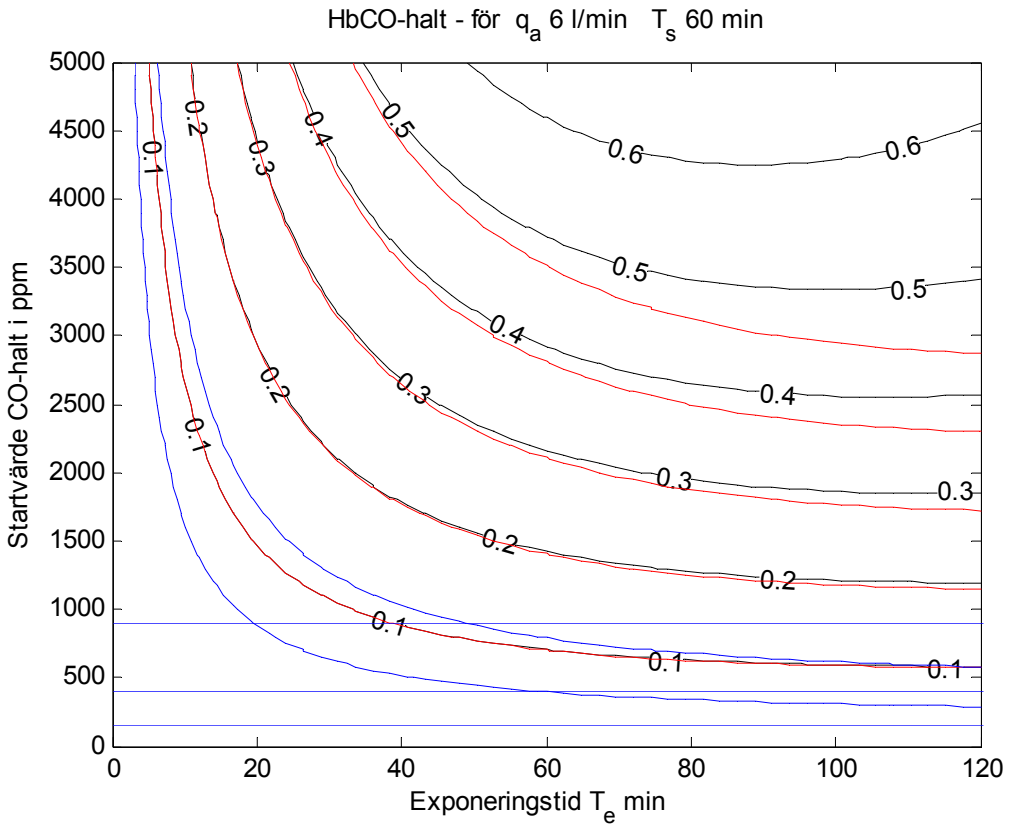
q_a l/min	T_e min	CO ppm	$HbCO_0$	HbCO	CO_{dos}/3e4	2·(5)/(6)	Figur
6	120	30	500	0.053	0.442	0.237	4.1
6	120	60	500	0.089	0.787	0.226	4.1
6	120	30	1000	0.105	0.885	0.237	4.1
6	120	60	1000	0.177	1.574	0.224	4.1
12	120	30	500	0.084	0.442	0.378	4.2
12	120	60	500	0.137	0.787	0.348	4.2
12	120	30	1000	0.166	0.885	0.376	4.2
12	120	60	1000	0.269	1.574	0.341	4.2
6	60	30	500	0.047	0.393	0.237	4.3
6	60	60	500	0.071	0.632	0.225	4.3
6	60	30	1000	0.093	0.787	0.236	4.3
6	60	60	1000	0.141	1.264	0.223	4.3
12	60	30	500	0.074	0.393	0.377	4.4
12	60	60	500	0.109	0.632	0.345	4.4
12	60	30	1000	0.148	0.787	0.375	4.4
12	60	60	1000	0.215	1.264	0.339	4.4
6	30	30	500	0.037	0.316	0.237	4.5
6	30	60	500	0.048	0.432	0.223	4.5
6	30	30	1000	0.075	0.632	0.236	4.5
6	30	60	1000	0.096	0.865	0.222	4.5
12	30	30	500	0.059	0.316	0.376	4.6
12	30	60	500	0.074	0.432	0.340	4.6
12	30	30	1000	0.118	0.632	0.374	4.6
12	30	60	1000	0.145	0.865	0.335	4.6



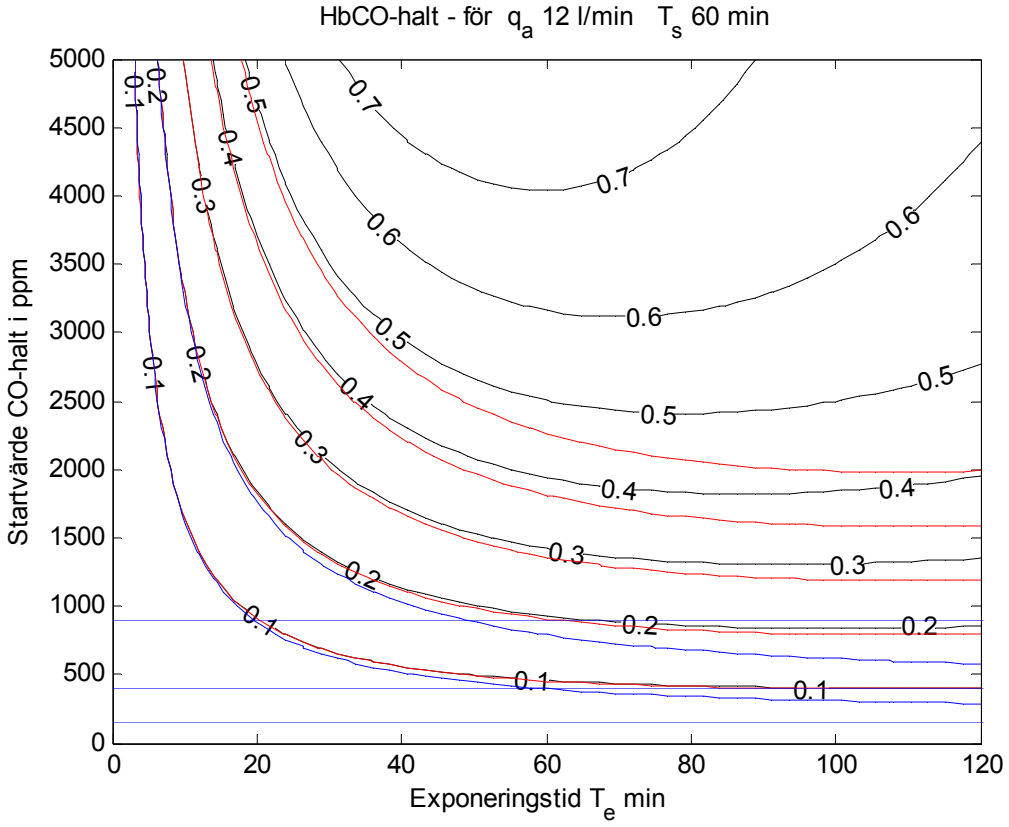
Figur 4.1 HbCO-halt för avklingande CO-halt, T_s = 120 min och q_a = 6 l/min.



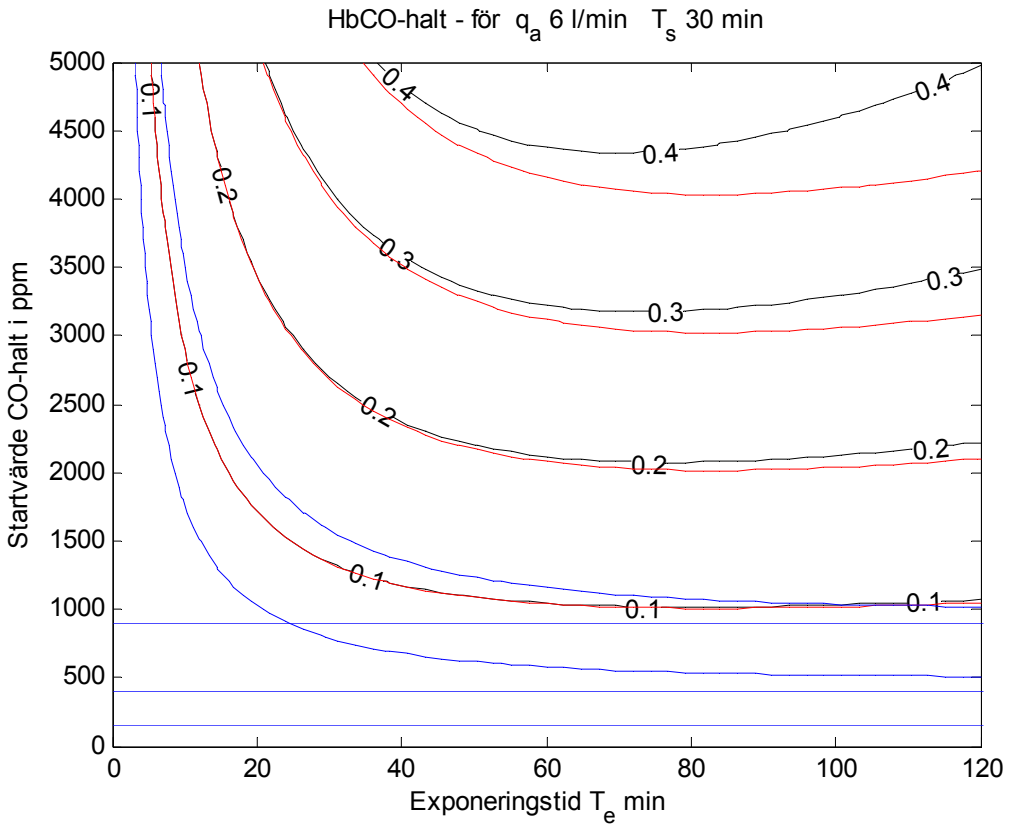
Figur 4.2 HbCO-halt för avklingande CO-halt, T_s = 120 min och q_a = 12 l/min.



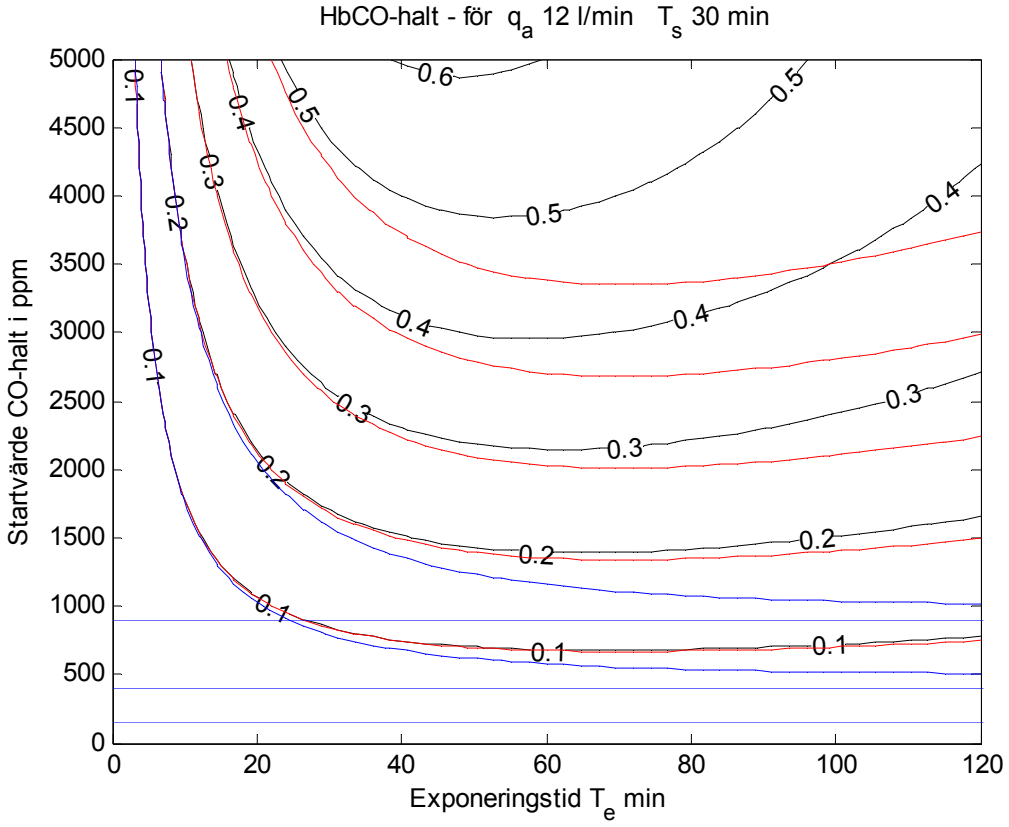
Figur 4.3 HbCO-halt för avklingande CO-halt, T_s = 60 min och q_a = 6 l/min.



Figur 4.4 HbCO-halt för avklingande CO-halt, T_s = 60 min och q_a = 12 l/min.



Figur 4.5 HbCO-halt för avklingande CO-halt, T_s = 30 min och q_a = 6 l/min.



Figur 4.6 HbCO-halt för avklingande CO-halt, T_s = 30 min och q_a = 12 l/min.

5 HbCO-nivå vid linjärt ökande CO-halt

Hur HbCO-halten beror på exponeringstiden vid konstant tillförsel av CO redovisas i Figur 5.1-8 för åtta kombinationer mellan andningsflödet 6 och 12 l/min och utan ventilation och med ventilationen med omsättningstiderna 120, 60 och 30 min. Kurvor för CO-dosen 15000 och 30000 ppmmin och linjer för CO-halter 150, 400 och 900 ppm motsvarande HbCO-jämviktshalt 0.2, 0.4 och 0.6 återfinns också i Figur 5.1-6. Isolinjer redovisas även för en förenklad beräkningsmetod för HbCO-halten, som överskattas obetydligt för låga HbCO-halter. Den förenklade beräkningsmetoden beskrivs i avsnitt 7.

Konstant tillförsel av CO är en förenkling av vad som sker under själva spridningen av brandgaser, vilket sker under förhållandevis kort tid i förhållande till ventilationens tidskala eller omsättningstid.

De angivna CO-halterna i detta avsnitt avser slutvärdet för ett fall utan ventilation efter den givna exponerings- och ramptiden.

Notera att tidsaxel omfattar endast 0-15 min och inte som tidigare i avsnitt 3 och 4 0-120 min. Skälet är att spridningsfasen är kort.

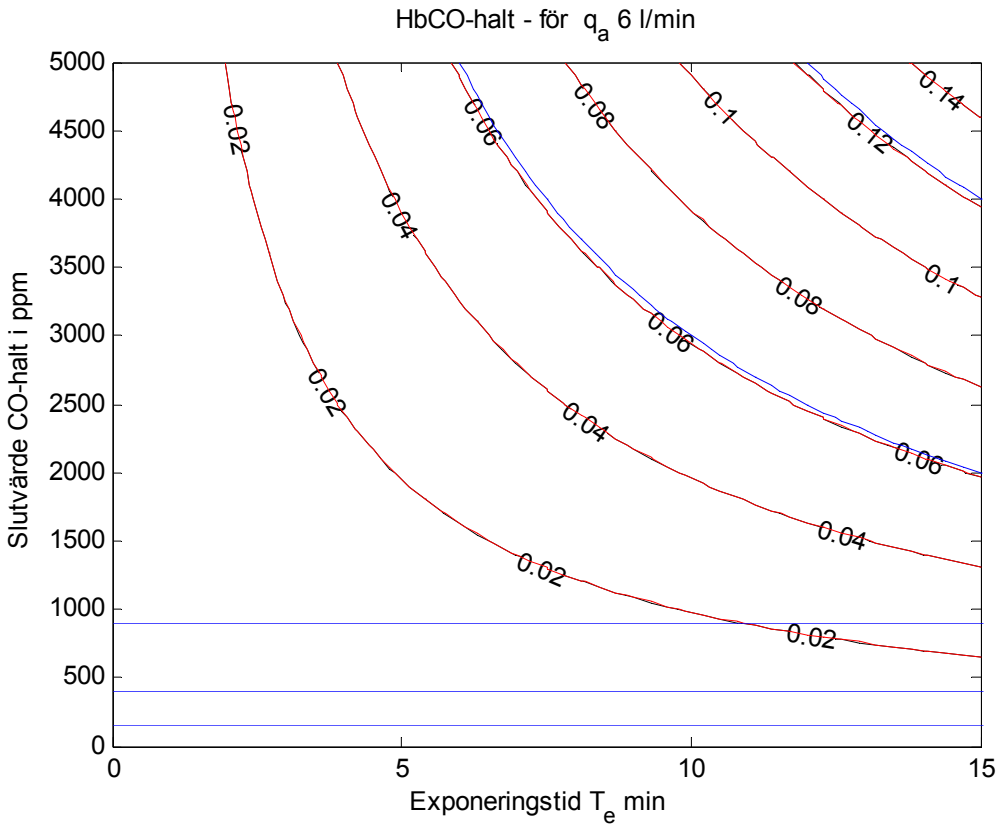
HbCO-värdena är nästan försumbara.

Fyra enskilda värden redovisas för varje kombination i Tabell 5.1 med avläsningar för exponeringstiderna 3 och 6 min och CO-halterna 500 och 1000 ppm. CO-dosen redovisas normaliserad mot 30000 ppmmin. En enkel jämförelse med kvoten mellan HbCO-halten och CO-dosen som 2 HbCO/(CO_{dos}/30000) visar att CO-dosen 30000 ppmmin överskattar ett farligt HbCO-värde 0.5. Siffervärdena i Tabell 5.1 är omkring 0.24 för det lägre andningsflödet och 0.40 för det högre andningsflödet.

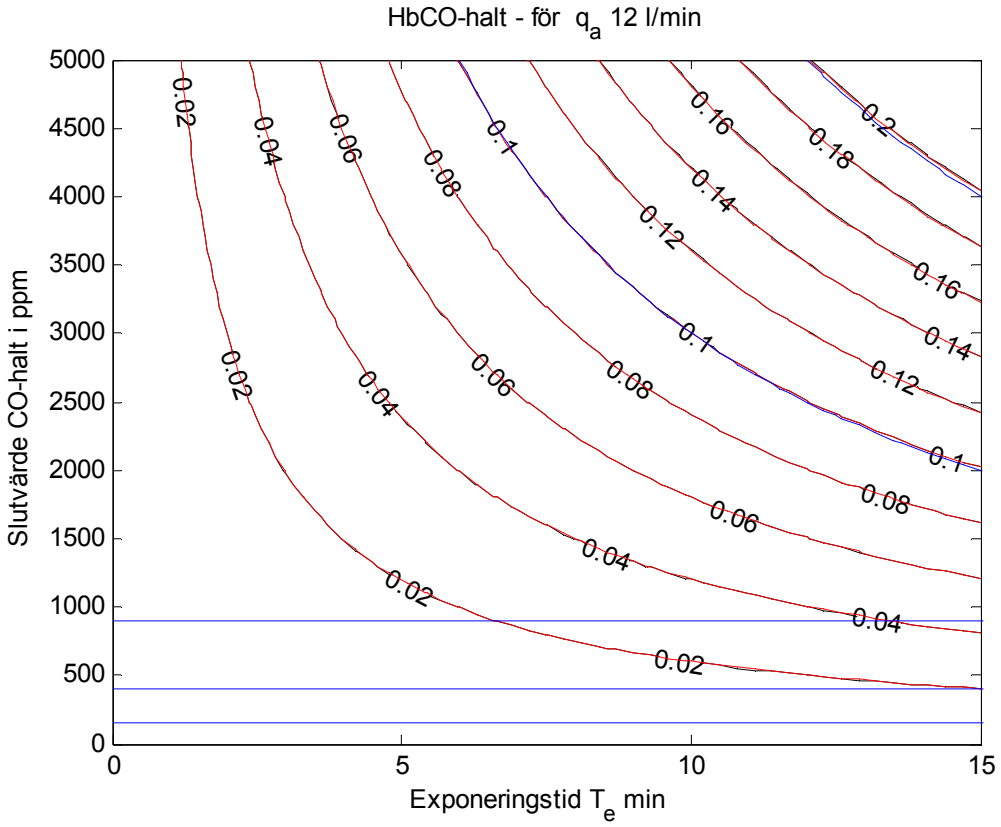
CO-dosen är högst för fallet utan ventilation och kan för detta fall beräknas som halva produkten mellan slutvärde och spridningstid. Siffrorna i Tabell 5.1 visar att ventilationen påverkar både HbCO-värde och CO-dos marginellt. Spridningstiden är högst en 1/5-del av ventilationens omsättningstid och som lägst en 1/40-del.

Tabell 5.1 Indata och resultat för simuleringsfall med linjärt ökande CO-halt.

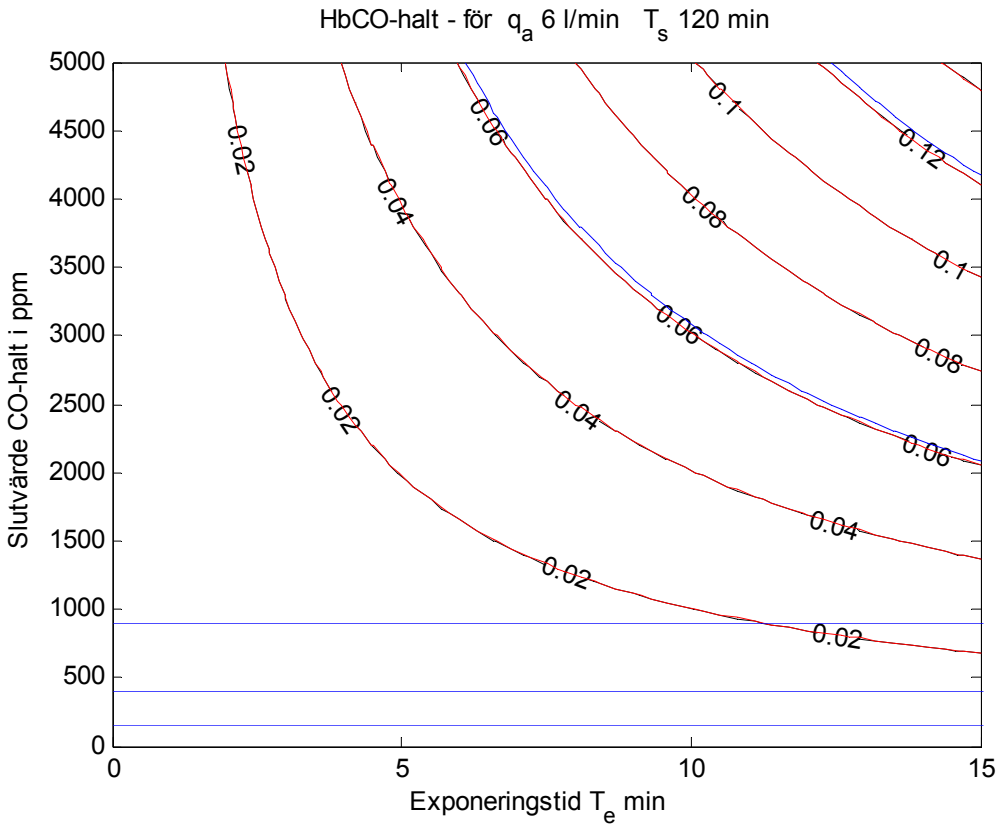
q_a l/min	T_e min	CO ppm	$HbCO_0$	HbCO	CO_{dos}/3e4	2·(5)/(6)	Figur
6	-	3	500	0.0031	0.0250	0.2478	5.1
6	-	6	500	0.0062	0.0500	0.2471	5.1
6	-	3	1000	0.0062	0.0500	0.2470	5.1
6	-	6	1000	0.0123	0.1000	0.2464	5.1
12	-	3	500	0.0051	0.0250	0.4048	5.2
12	-	6	500	0.0101	0.0500	0.4031	5.2
12	-	3	1000	0.0101	0.0500	0.4041	5.2
12	-	6	1000	0.0201	0.1000	0.4023	5.2
6	120	3	500	0.0031	0.0248	0.2478	5.3
6	120	6	500	0.0061	0.0492	0.2471	5.3
6	120	3	1000	0.0061	0.0496	0.2470	5.3
6	120	6	1000	0.0121	0.0984	0.2464	5.3
12	120	3	500	0.0050	0.0248	0.4048	5.4
12	120	6	500	0.0099	0.0492	0.4031	5.4
12	120	3	1000	0.0100	0.0496	0.4041	5.4
12	120	6	1000	0.0198	0.0984	0.4023	5.4
6	60	3	500	0.0030	0.0246	0.2478	5.5
6	60	6	500	0.0060	0.0484	0.2471	5.5
6	60	3	1000	0.0061	0.0492	0.2470	5.5
6	60	6	1000	0.0119	0.0967	0.2464	5.5
12	60	3	500	0.0050	0.0246	0.4049	5.6
12	60	6	500	0.0097	0.0484	0.4031	5.6
12	60	3	1000	0.0099	0.0492	0.4041	5.6
12	60	6	1000	0.0195	0.0967	0.4023	5.6
6	30	3	500	0.0030	0.0242	0.2478	5.7
6	30	6	500	0.0058	0.0468	0.2472	5.7
6	30	3	1000	0.0060	0.0484	0.2470	5.7
6	30	6	1000	0.0115	0.0937	0.2464	5.7
12	30	3	500	0.0049	0.0242	0.4049	5.8
12	30	6	500	0.0094	0.0468	0.4031	5.8
12	30	3	1000	0.0098	0.0484	0.4041	5.8
12	30	6	1000	0.0188	0.0937	0.4023	5.8



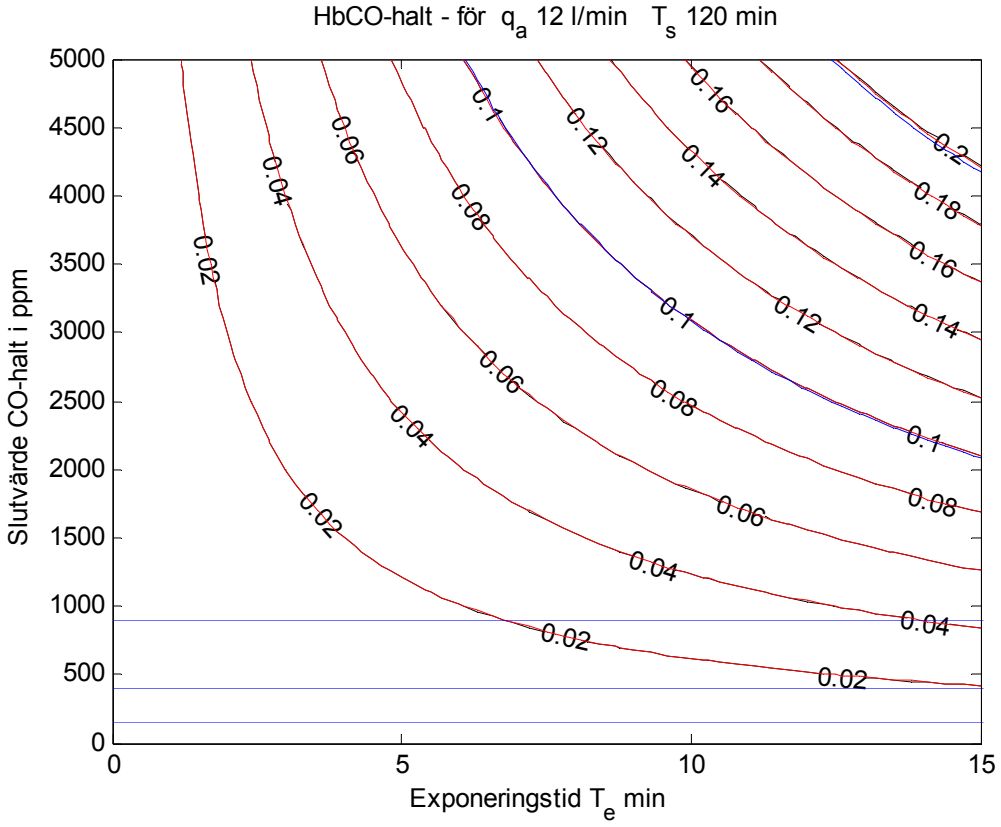
Figur 5.1 HbCO-halt för ökande CO-halt, utan ventilation och q_a = 6 l/min.



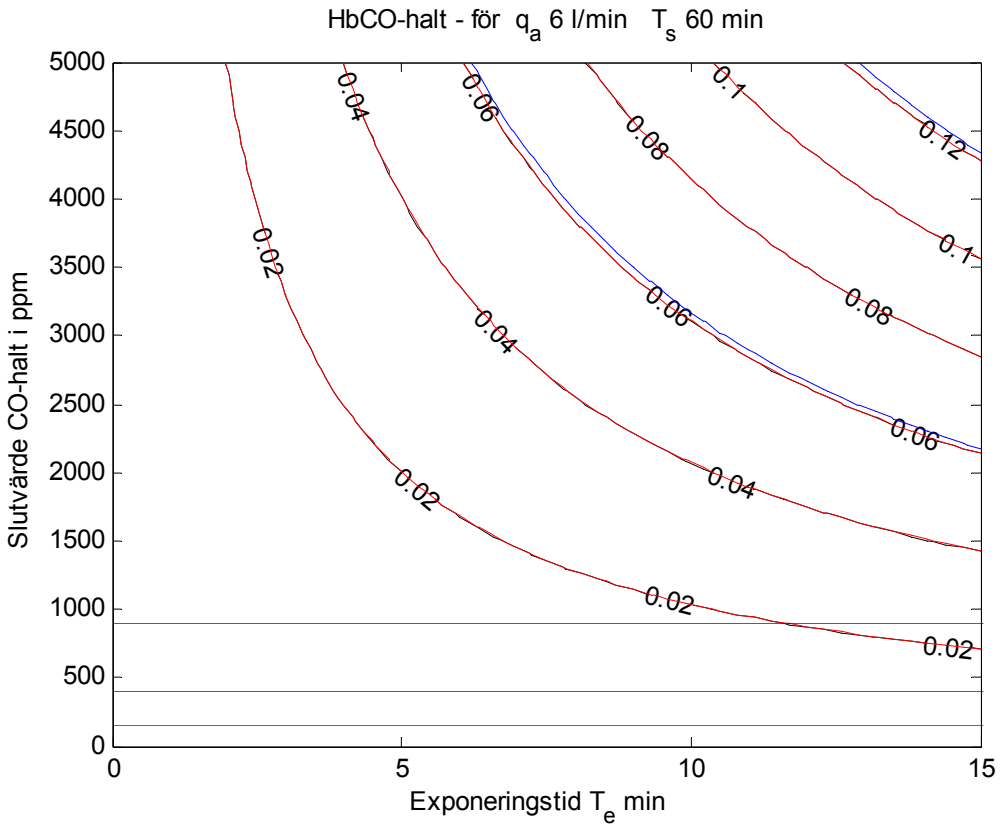
Figur 5.2 HbCO-halt för ökande CO-halt, utan ventilation och q_a = 12 l/min.



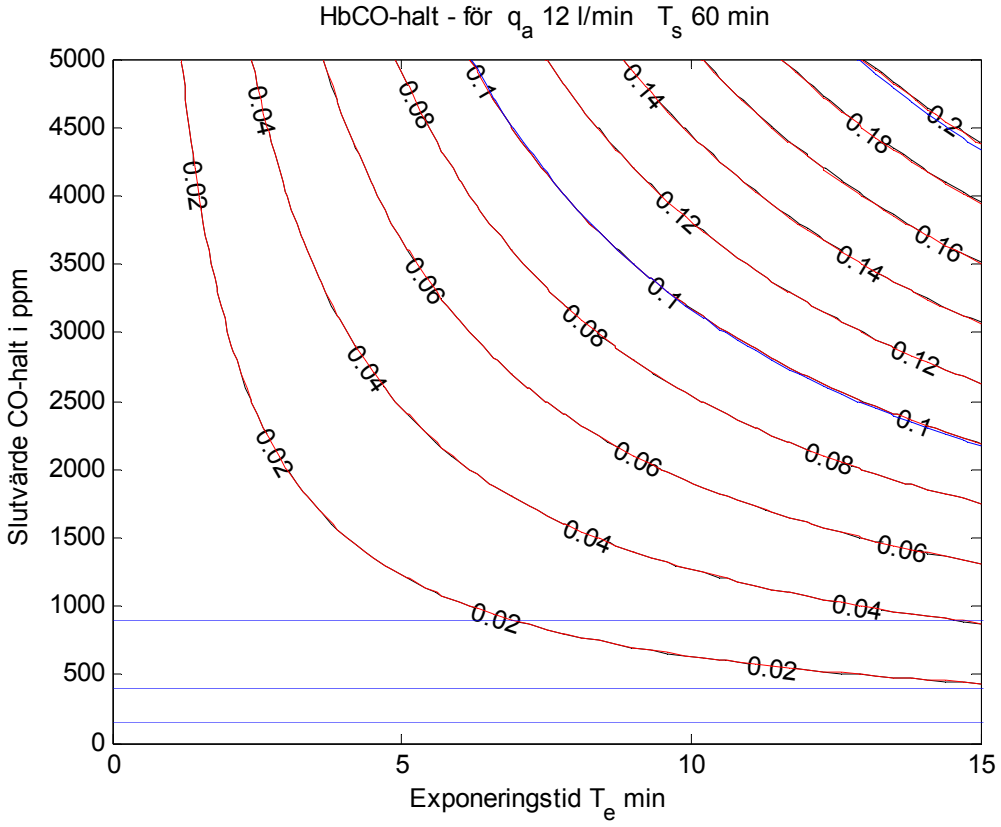
Figur 5.3 HbCO-halt för ökande CO-halt, T_s = 120 min och q_a = 6 l/min.



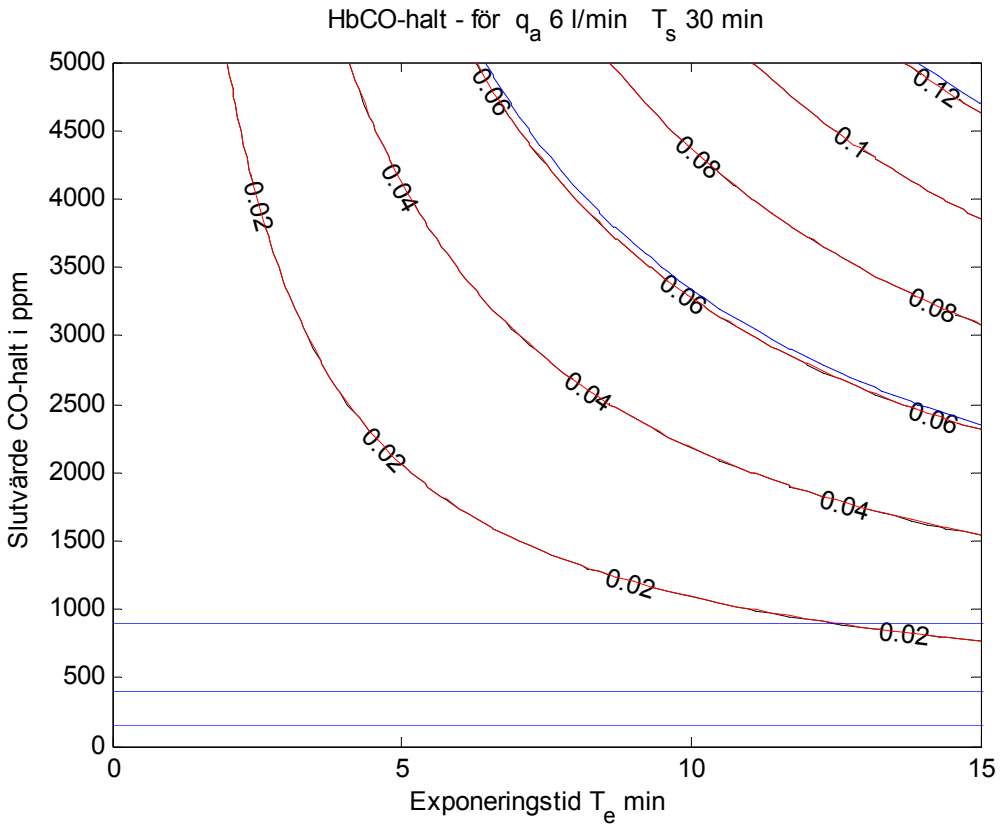
Figur 5.4 HbCO-halt för ökande CO-halt, T_s = 120 min och q_a = 12 l/min.



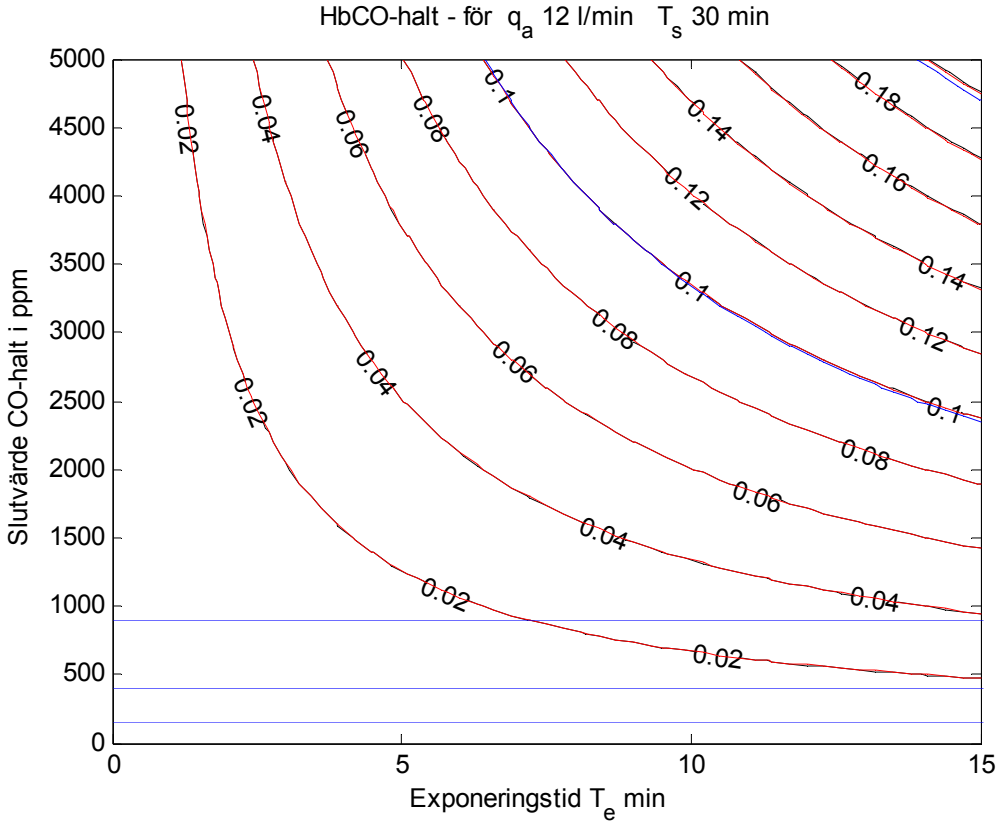
Figur 5.5 HbCO-halt för ökande CO-halt, T_s = 60 min och q_a = 6 l/min.



Figur 5.6 HbCO-halt för ökande CO-halt, T_s = 60 min och q_a = 12 l/min.



Figur 5.7 HbCO-halt för ökande CO-halt, T_s = 30 min och q_a = 6 l/min.



Figur 5.8 HbCO-halt för ökande CO-halt, T_s = 30 min och q_a = 12 l/min.

6 Högsta HbCO-nivå som funktion av luftomsättning

Detta avsnitt behandlar avklingande CO-halt som i avsnitt 4, men endast tre exponeringstider 30, 60 och 120 min behandlas här mot tidigare en variabel exponeringstid som x-axel upptill 120 min. Den variabla exponeringstiden har ersatts med en variabel luftomsättning som x-axel upptill 4 /h mot tidigare tre luftomsättningstider 30, 60 och 120 m eller luftomsättningar 0.5, 1 och 2 /h. Fördelen är att kolmonoxidförgiftning kan bestämmas för att luftomsättningar upptill 4 /h.

Hur den högsta HbCO-nivån och tiden till den högsta HbCO-nivån beror på luftsomsättningen vid avklingande CO-halt redovisas i detta avsnitt för sex kombinationer mellan andningsflödet 6 och 12 l/min och exponeringstiderna 30, 60 och 120 min. Luftomsättningen från 0 till 4 /h är x-axel. CO-haltens startvärde från 0 till 5000 ppm är y-axel.

Tiden för högsta HbCO-värde redovisas för de två andningsflödena 6 och 12 l/min i Figur 6.1 respektive 6.2 enligt exakt beräkning av HbCO-halt. Förenklad beräkning ger samma tid till högsta HbCO-halt oberoende av startvärdet för CO-halt, vilket motsvarar vertikala isolinjer i Figur 6.1 och 6.2 som nästan sammanfaller med exakt beräkning för låga startvärden för CO-halt.

Hur den högsta HbCO-nivån beror på luftsomsättningen vid avklingande CO-halt redovisas i Figur 6.3-8 för sex kombinationer mellan andningsflödet 6 och 12 l/min och exponeringstiderna 30, 60 och 120 min. Luftomsättningen från 0 till 4 /h är x-axel. CO-haltens startvärde från 0 till 5000 ppm är y-axel.

Kurvor för CO-dosen 15000 och 30000 ppmmin och linjer för CO-halter 150, 400 och 900 ppm motsvarande HbCO-jämviktshalt 0.2, 0.4 och 0.6 återfinns också i Figur 6.3-8.

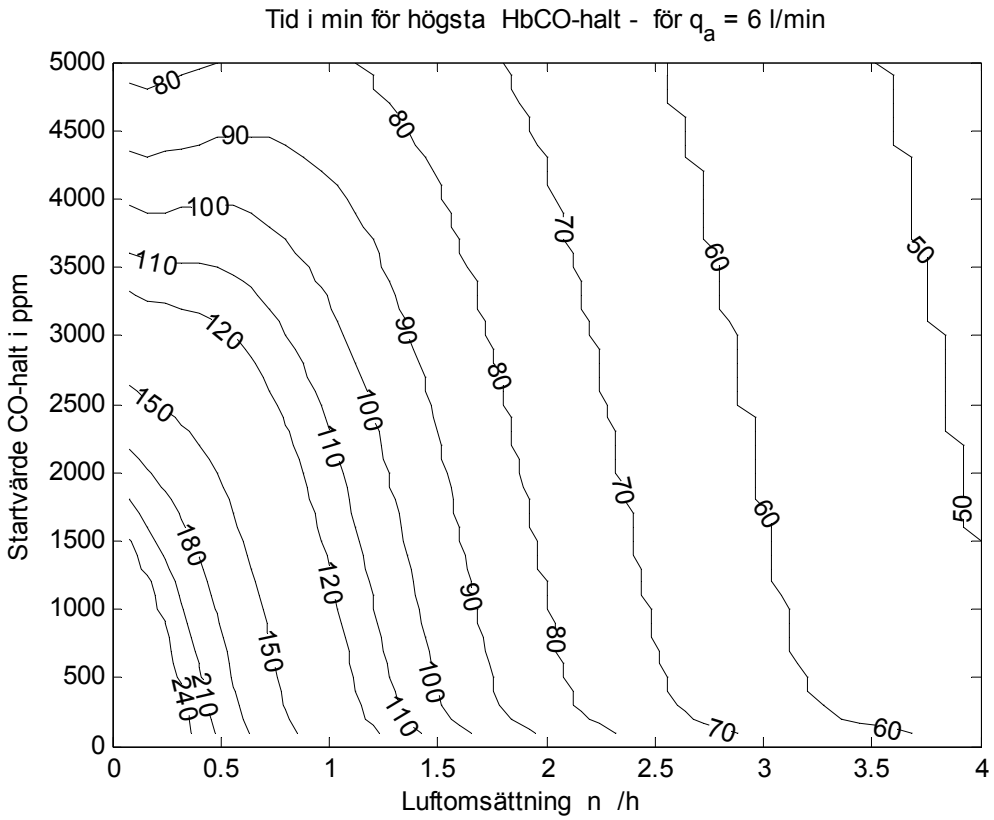
Isolinjer redovisas även för en förenklad beräkningsmetod för HbCO-halter upptill 0.3, som överskattas obetydligt för låga HbCO-halter. Den förenklade beräkningsmetoden beskrivs i avsnitt 7.

Överensstämmelsen mellan den exakta och förenklade beräkningen är mycket bra för HbCO-nivån 0.1 och bra för HbCO-nivån 0.2.

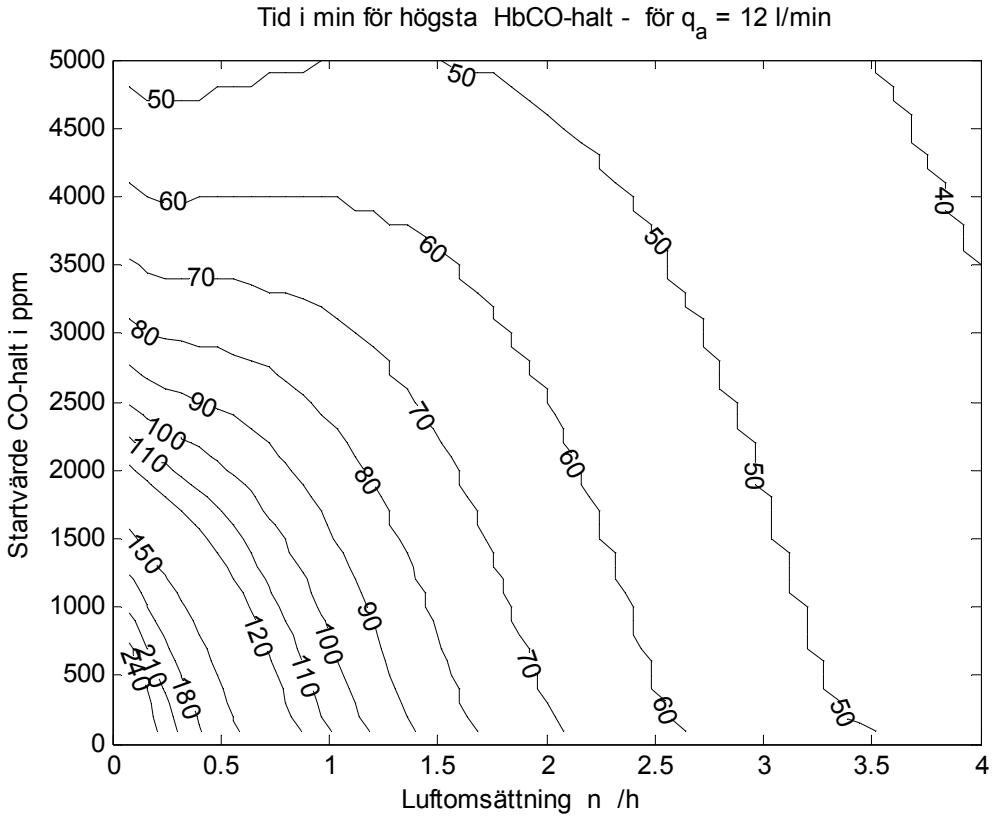
Vilken kolmonoxidförgiftningen kan bli för CO-dosen 30000 ppmmin har beräknats med antagande om avklingning och oändlig exponeringstid, vilket ger följande samband mellan startvärdet för CO-halt *CO*, luftomsättningstid *S* min och luftomsättning *n* /h.

$$30000 = CO\ S = CO\ 60 / n \qquad \text{(ppmmin)}$$

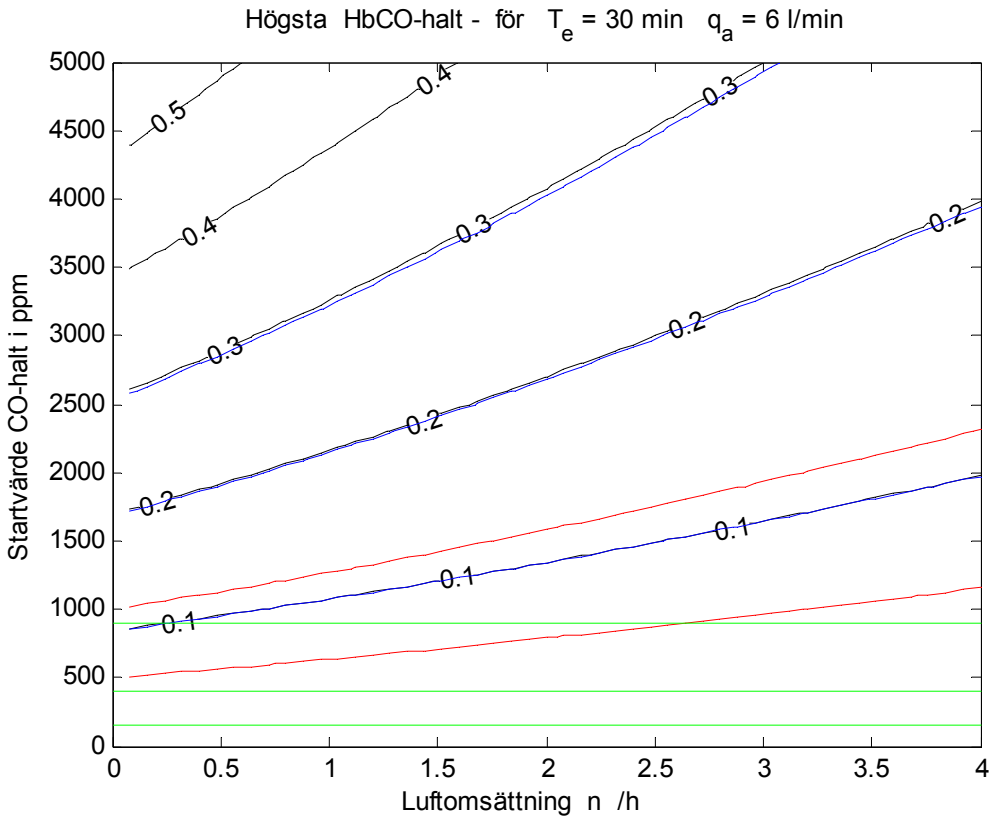
Högsta HbCO-halt redovisas i Figur 6.9 för exakt modell enligt (2.9) och förenklad modell enligt (7.2) som funktion av luftomsättning och för två andningsflöden 6 och 12 l/min. Kurvorna i Figur 6.9 visar att HbCO-halten ökar med på andningsflödet. Samma CO-dos ger alltså olika HbCO-halt. Tiden till högsta HbCO-halt redovisas i Figur 6.10 på samma sätt.



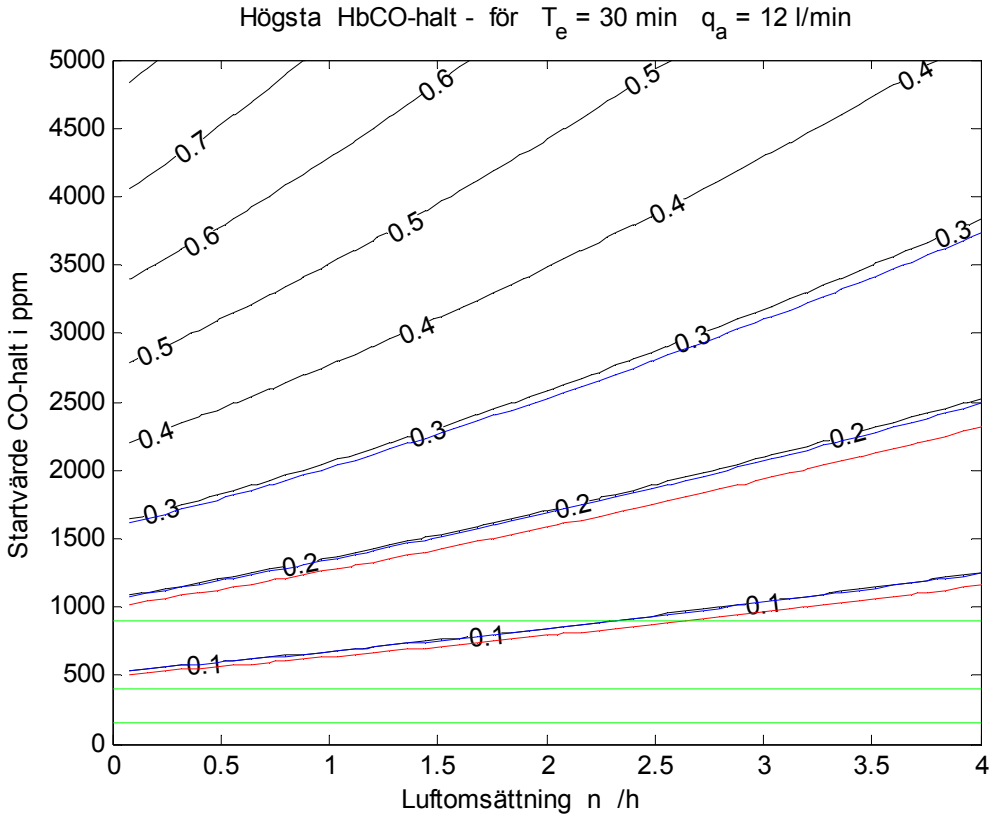
Figur 6.1 Tid till högsta HbCO-halt som funktion av luftomsättning och CO-starthalt för andningsflödet q_a = 6 l/min.



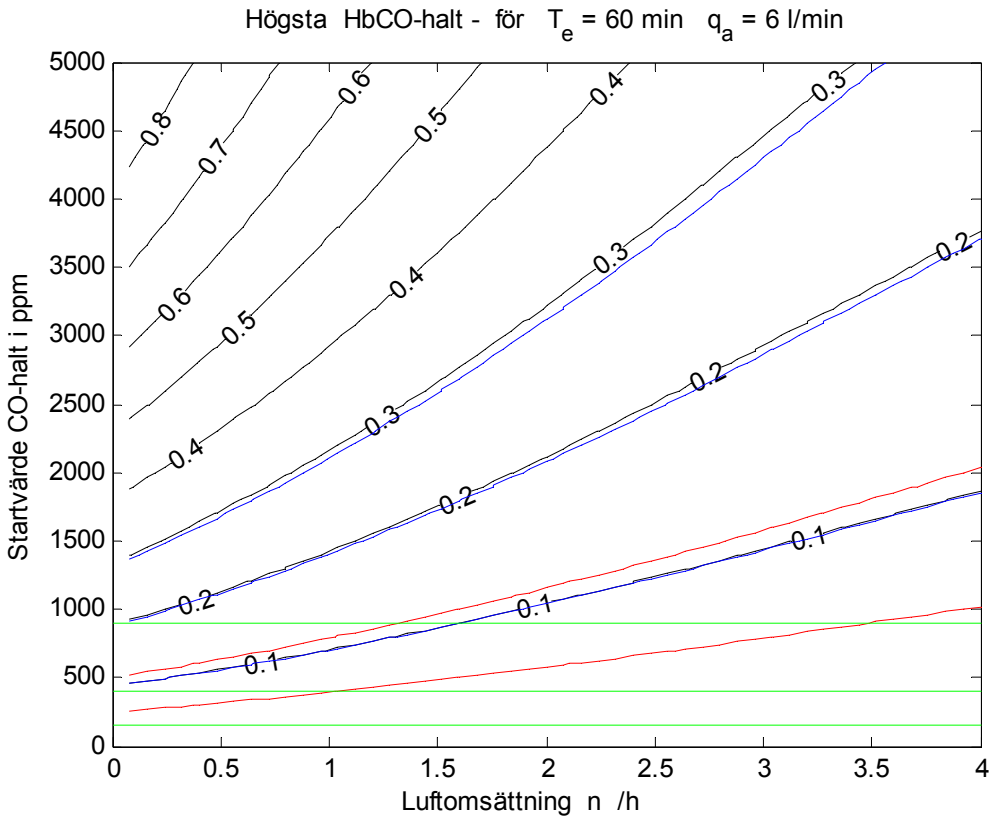
Figur 6.2 Tid till högsta HbCO-halt som funktion av luftomsättning och CO-starthalt för andningsflödet q_a = 12 l/min.



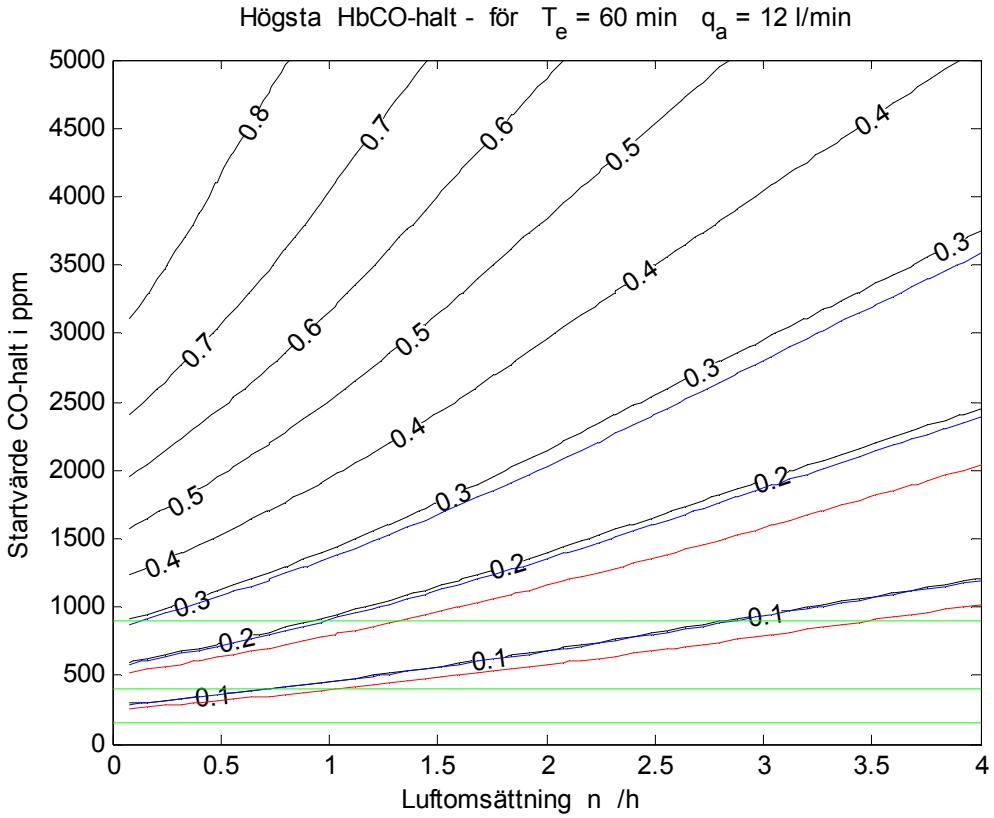
Figur 6.3 Högsta HbCO-halt som funktion av luftomsättning och CO-starthalt för exponeringstid T_e = 30 min och andningsflödet q_a = 6 l/min.



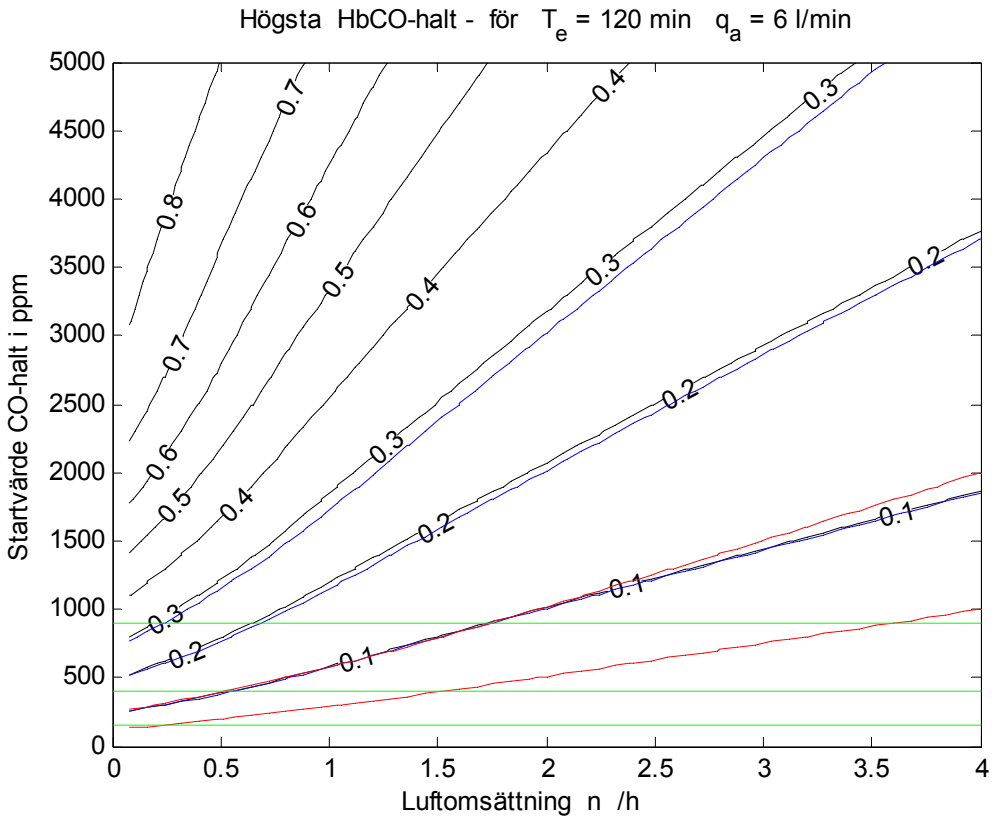
Figur 6.4 Högsta HbCO-halt som funktion av luftomsättning och CO-starthalt för exponeringstid T_e = 30 min och andningsflödet q_a = 6 l/min.



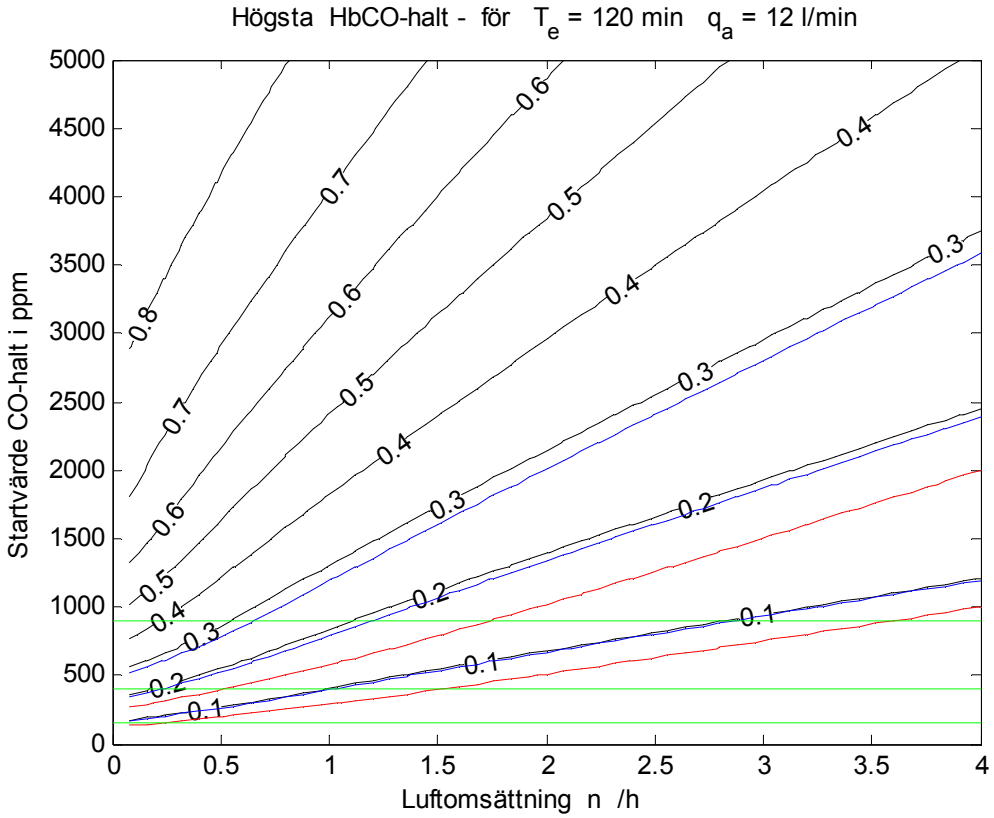
Figur 6.5 Högsta HbCO-halt som funktion av luftomsättning och CO-starthalt för exponeringstid T_e = 60 min och andningsflödet q_a = 6 l/min.



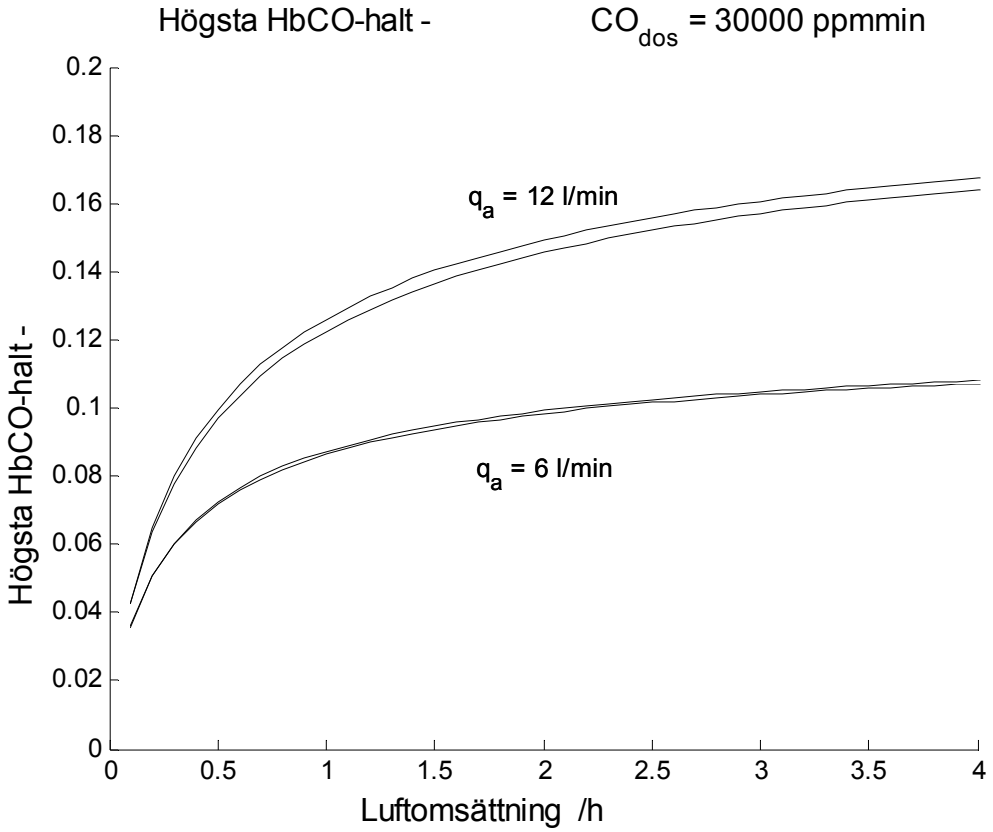
Figur 6.6 Högsta HbCO-halt som funktion av luftomsättning och CO-starthalt för exponeringstid T_e = 60 min och andningsflödet q_a = 12 l/min.



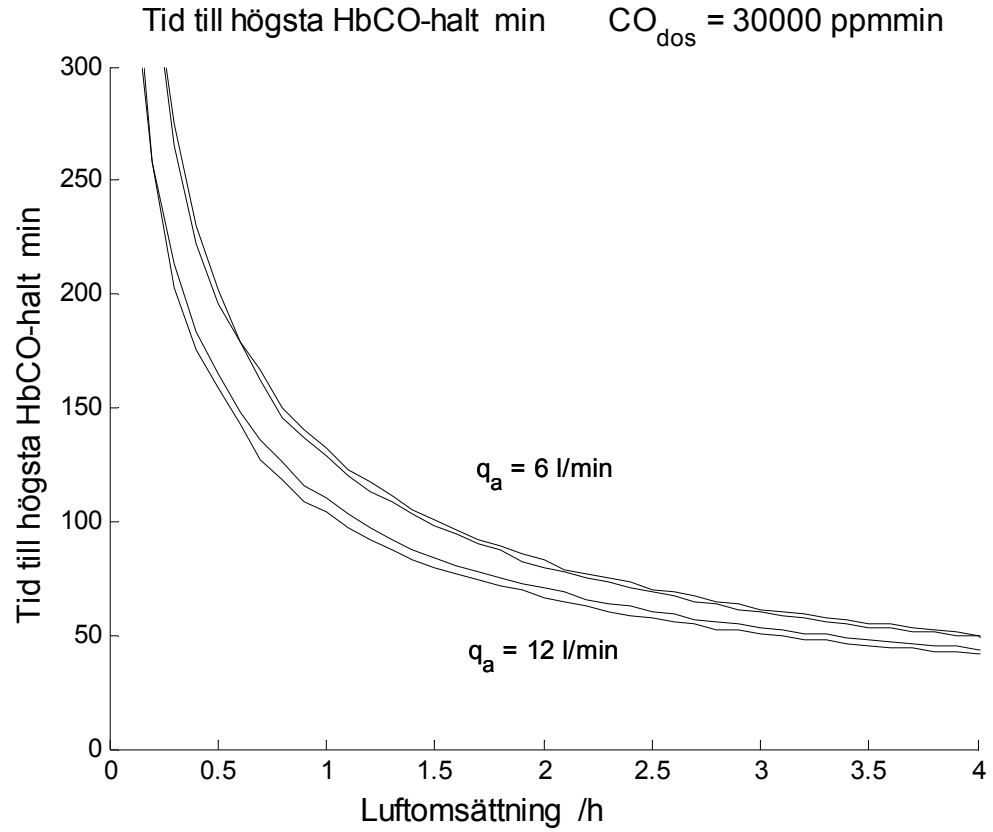
Figur 6.7 Högsta HbCO-halt som funktion av luftomsättning och CO-starthalt för exponeringstid T_e = 120 min och andningsflödet q_a = 6 l/min.



Figur 6.8 Högsta HbCO-halt som funktion av luftomsättning och CO-starthalt för exponeringstid T_e = 120 min och andningsflödet q_a = 12 l/min.



Figur 6.9 Högsta HbCO-halt som funktion luftomsättning för CO-dos 30000 ppmmin.



Figur 6.10 Tid till högsta HbCO-halt som funktion luftomsättning för CO-dos 30000 ppmmin.

7 Förenklat samband för kolmonoxidförgiftning

Några frågeställningar är följande: Vilken grad av kolmonoxidförgiftning kan högst tillåtas för personskydd? Går det att bestämma explicita beräkningsuttryck för kolmonoxidförgiftning för detta område? Går det att beräkna kolmonoxidförgiftning med CO-dos för detta område?

HbCO-värdena 0.2, 0.4 och 0.6 anger gränser mellan lindrig, måttlig, allvarlig och dödlig kolmonoxidförgiftning. Ett rimligt gränsvärde för personskydd är att högst lindrig kolmonoxidförgiftning får inträffa, vilket motsvarar det relativa gränsvärdet 0.2 för HbCO-halten.

Sambandet (2.9) är en olinjär differentialekvation och det går inte att bestämma ett analytiskt uttryck, men om delen som skapar olinjäriteten i (2.7+8) nedan slopas kommer kolmonoxidförgiftningen att överskattas måttligt för låga värden på HbCO-halt.

$$P_{COb} = P_{OOb}\,[HbCO] / M\,(\,[Hb] - [HbCO]\,) \qquad \text{(mm Hg)} \qquad (2.7+8)$$

Sambandet enligt (2.7+8) kan linjäriseras med avseende på *[HbCO]* genom att ersätta *[Hb] - [HbCO]* i nämnaren med endast *[Hb]* och försumma *[HbCO]*, vilket ger:

$$P_{COb} = P_{OOb}\,[HbCO] / M\,[Hb] \qquad \text{(mm Hg)} \qquad (7.1)$$

Förenklingen enligt (7.1) underskattar partialtrycket för CO i lungkapillärer, mmHg, med en faktor $1-[HbCO]/[Hb] < 1$, eftersom $0 < [HbCO] < [Hb]$. Den bromsande termen i (2.9) underskattas, vilket medför att tidsförloppet för kolmonoxidförgiftningen överskattas. Detta ger en liten extra säkerhetsmarginal mot exakt beräkning. Sambandet enligt (2.9) kan förenklas ytterligare genom att försumma kroppens CO-produktion, flödet q_{CO}, införa den relativa HbCO-halten *HbCO* för kvoten *[HbCO/Hb]* eller andelen kolmonoxid i blodet och införa två parametrar *T* och *CO* samt införa $CO_{0.5}$ enligt (2.13), vilket ger:

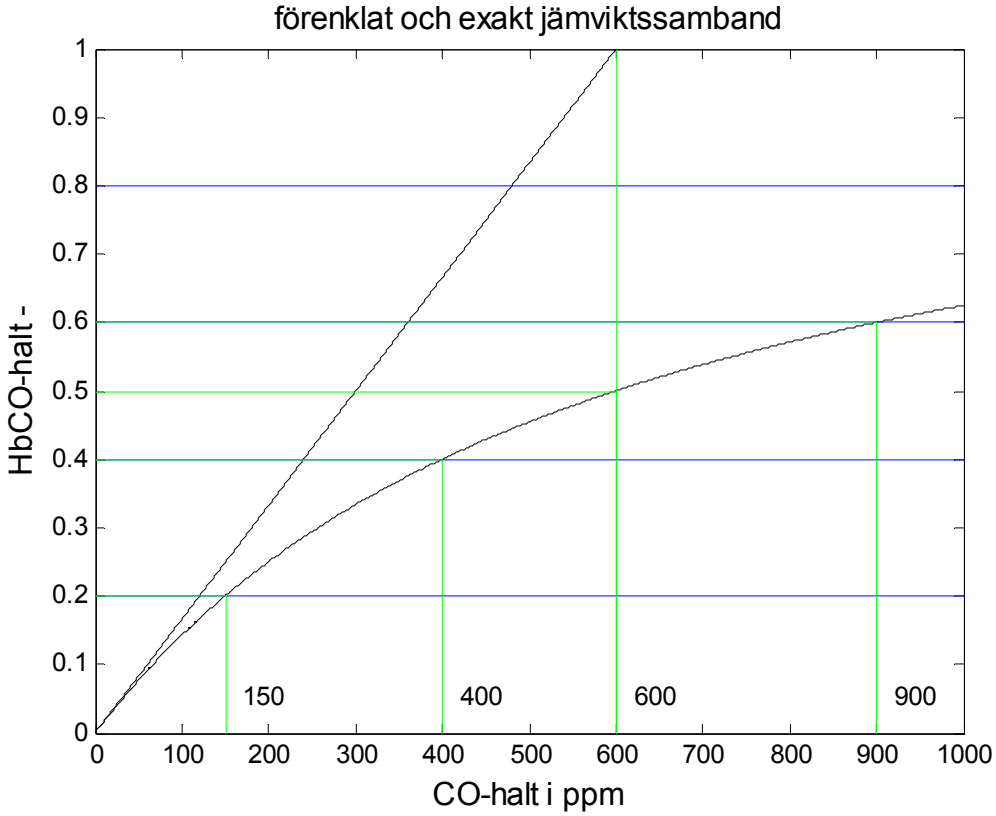
$$T\,dHbCO/dt = -\,HbCO + CO / CO_{0.5} \qquad (-) \qquad (7.2)$$

$$T = V_b\,B\,M\,[Hb] / P_{OOb} \qquad \text{(min)} \qquad (7.3)$$

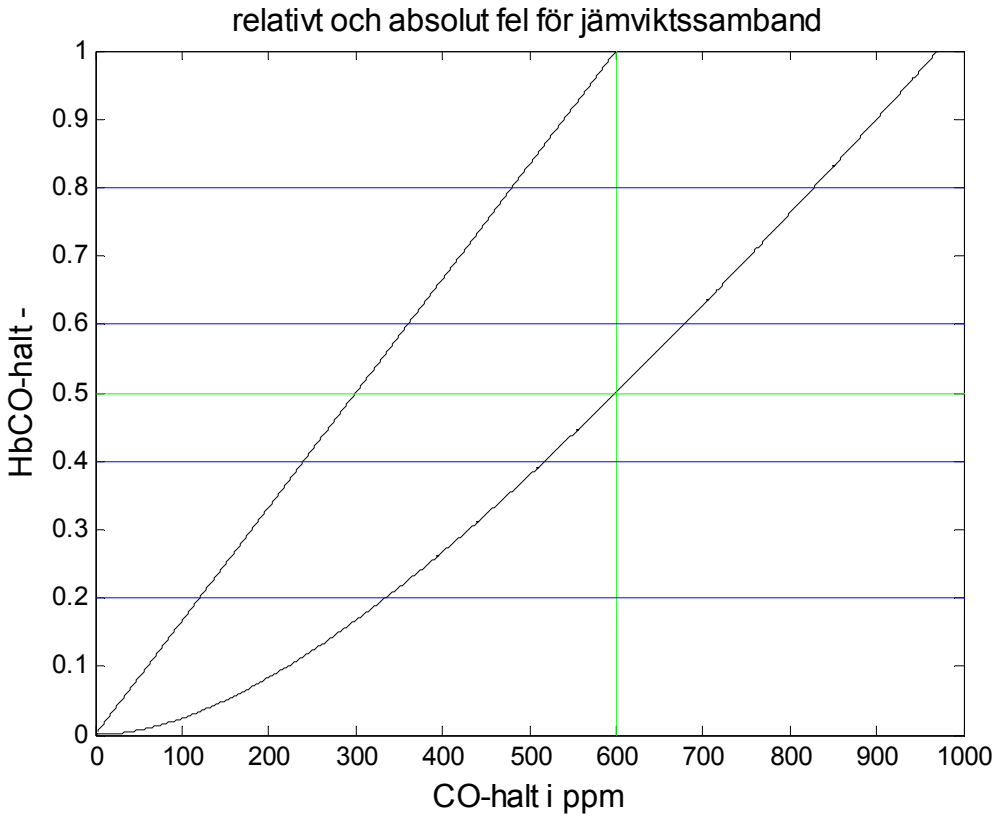
$$CO = P_{COa} / P_L \qquad (-) \qquad (7.4)$$

Parametern *T* är tidskonstanten för sambandet (7.2) och anger hur snabbt en förändring av andelen kolmonoxid i blodet sker för en ändring av luftens CO-halt *CO*. Denna tidskonstant *T* skall inte förväxlas med ventilationens tidskonstant eller luftomsättningstiden som anges med parametern *S*. Notera att parametern *B* är en funktion av andningsluftflödet q_a som i sin tur är en funktion av aktiviteten. Tids-konstanten *T* blir 378 och 230 min för andningsluftflödet 6000 ml/min respektive 12000 ml/min.

Jämviktssambandet mellan *HbCO* och *CO* ges av (7.2) och är $HbCO = CO / CO_{0.5}$. Det exakta olinjära enligt (1.1) och det förenklade linjära jämviktssambandet redovisas i Figur 7.1 och motsvarande absolut och relativt fel i Figur 7.2.



Figur 7.1 Förenklat och exakt jämviktssamband.



Figur 7.2 Relativt och absolut fel för jämviktssamband

Samband för konstant CO-halt

Kolmonoxidförgiftningen kan beräknas för ett startvärde *HbCO(0)*, en konstant CO-halt *CO* och en exponeringstid *t* med samband (7.2-4) och resultatet kan skrivas som följer:

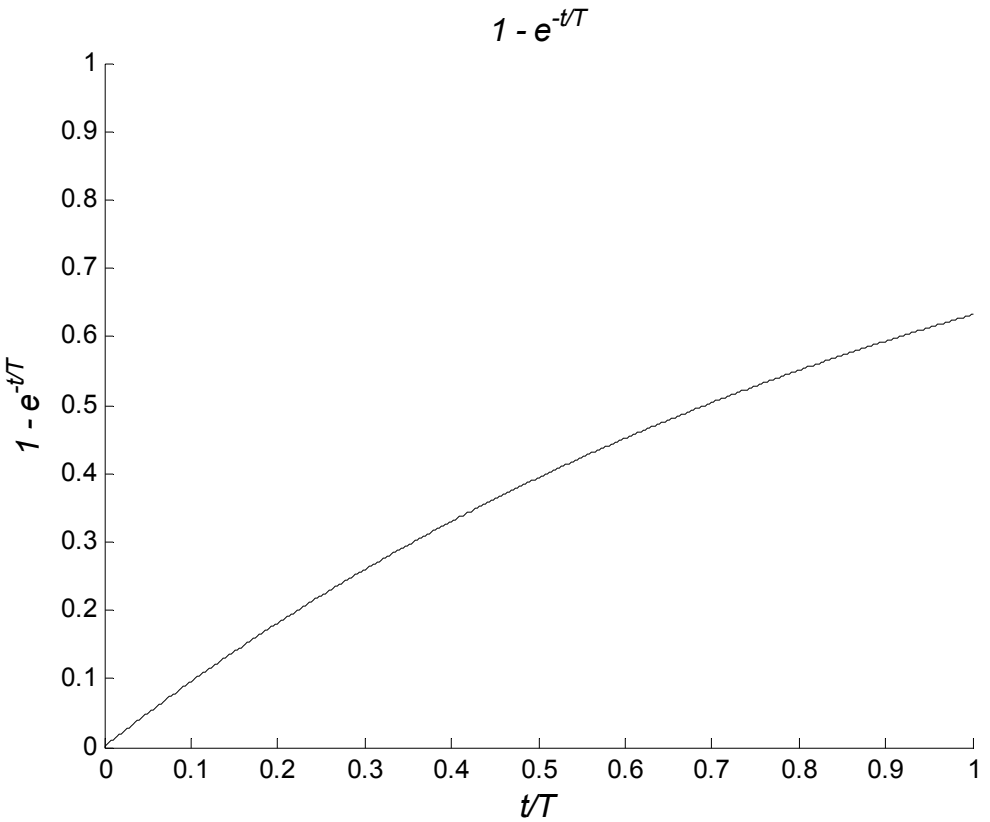
$$CO(t) = CO \qquad (-) \qquad (7.5)$$

$$HbCO(t) = HbCO(0)\, e^{-t/T} + CO\,(1 - e^{-t/T}) / CO_{0.5} \qquad (-) \qquad (7.6)$$

Uttrycket (7.6) visar att slutvärdet kan bli $CO/\, CO_{0.5}$ för exponeringstider *t* längre än tidskonstanten *T*. Resultatet blir givetvis orimligt om $CO > CO_{0.5}$. Uttrycket är en förenklad beräkning med rimlig noggrannhet när $[HbCO/Hb] < 0.2$. Faktorn $1 - e^{-t/T}$ redovisas i Figur 7.3 som funktion av kvoten *t/T*.

Uttrycket (7.6) kan användas för att beskriva tidsförloppet vid avgiftning med ett startvärde *HbCO(0)* och en låg omgivande kolmonoxidnivå *CO* nära noll. Tidsförloppet är långsamt, eftersom tidskonstanten *T* är flera timmar. Förgiftningen reduceras med en faktor 0.368 (e^{-1}) för ett tidsintervall $t = T$. Exempel på avgiftning redovisas i Figur 7.11.

Några sifferexempel med (7.6) är med $T = 378$ min, $CO_{0.5} = 643$ ppm och $CO = 1000$ ppm, vilket för exponeringstiderna 30, 60 och 120 min ger HbCO-andelarna 0.119, 0.228 respektive 0.423. Exakt beräkning enligt (2.11-14) ger förgiftningsandelarna 0.119, 0.226 respektive 0.399. Felet är ytterst litet för förgiftningsandel < 0.2.



Figur 7.3 Faktorn $1 - e^{-t/T}$ som funktion av kvoten *t/T*.

Samband för avklingande CO-halt

Kolmonoxidförgiftningen kan beräknas för avklingande CO-halt med startvärdet *CO* enligt (7.7), exponeringstid *t* och luftomsättningstid *S* med samband (7.2-5). Resultatet kan skrivas som följer utan någon kolmonoxidförgiftning i starten:

$$CO(t) = e^{-t/S}\, CO \qquad (-) \qquad (7.7)$$

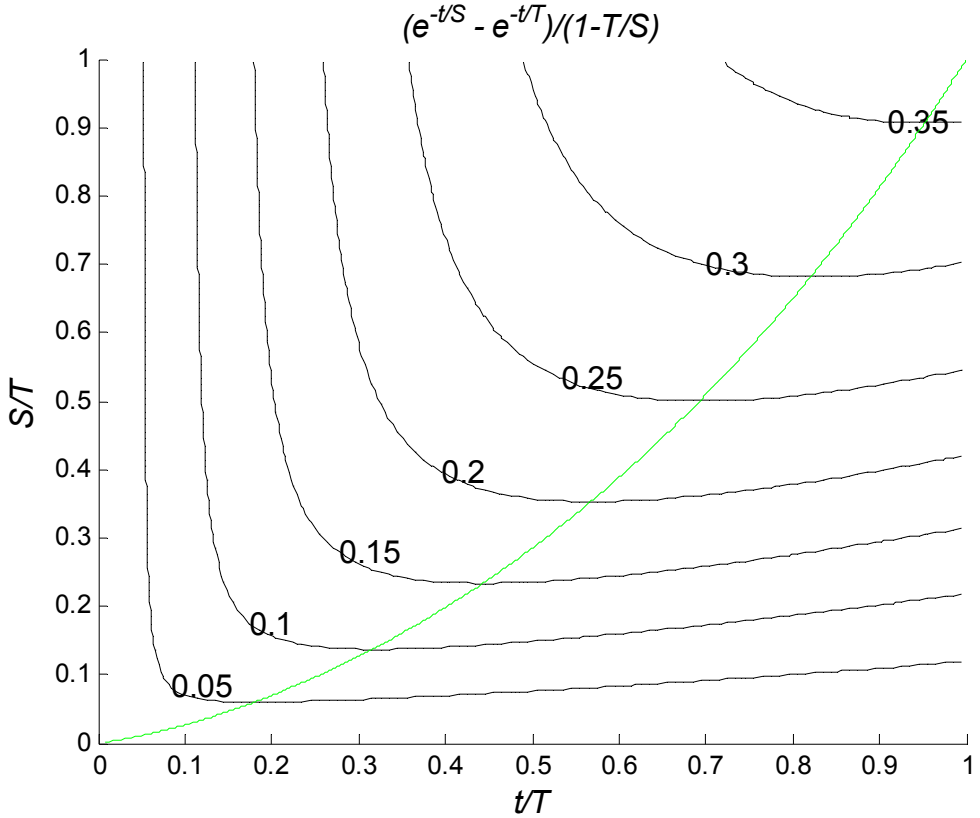
$$HbCO(t) = CO(e^{-t/S} - e^{-t/T})/(1-T/S)CO_{0.5} \quad T <> S \qquad (-) \qquad (7.8a)$$
$$HbCO(t) = CO\, e^{-t/T}\, t / T\, CO_{0.5} \quad T = S \qquad (-) \qquad (7.8b)$$

Fallet utan ventilation blir (7.8) identiskt med (7.6). Samma sifferexempel med (7.8) som för konstant CO-nivå ger HbCO-andelarna 0.093, 0.142 respektive 0.174. Exakt beräkning enligt (2.11-14) ger samma resultat. Faktorn $(e^{-t/S} - e^{-t/T}) / (1 - T/S)$ redovisas i Figur 7.4 som funktion av kvoterna *t/T och S/T*.

Uttrycken (7.8a) och (7.8b) har båda ett maximum för en tidpunkt t_{max} som kan anges:

$$t_{max} = ln(S/T)/(1/T-1/S) \quad T <> S \qquad (-) \qquad (7.9a)$$
$$t_{max} = T \quad T = S \qquad (-) \qquad (7.9b)$$

Maximum för HbCO-halten för en given kvot *S/T* är markerad i Figur 7.4 för *T* <>*S*. Särfallet *T* = *S* har sitt maximum för *t/T* = 1 och *S/T* = 1 i Figur 7.4.



Figur 7.4 Faktorn $(e^{-t/S} - e^{-t/T}) / (1 - T/S)$ som funktion av kvoterna *t/T och S/T*.

Samband för linjärt ökande CO-halt

Kolmonoxidförgiftningen kan beräknas för given linjärt ökande CO-halt med slutvärdet *CO* enligt (7.10) efter tiden *s* och en given exponeringstid *t* med samband (7.2-5) och resultatet kan skrivas som följer utan någon kolmonoxidförgiftning i starten:

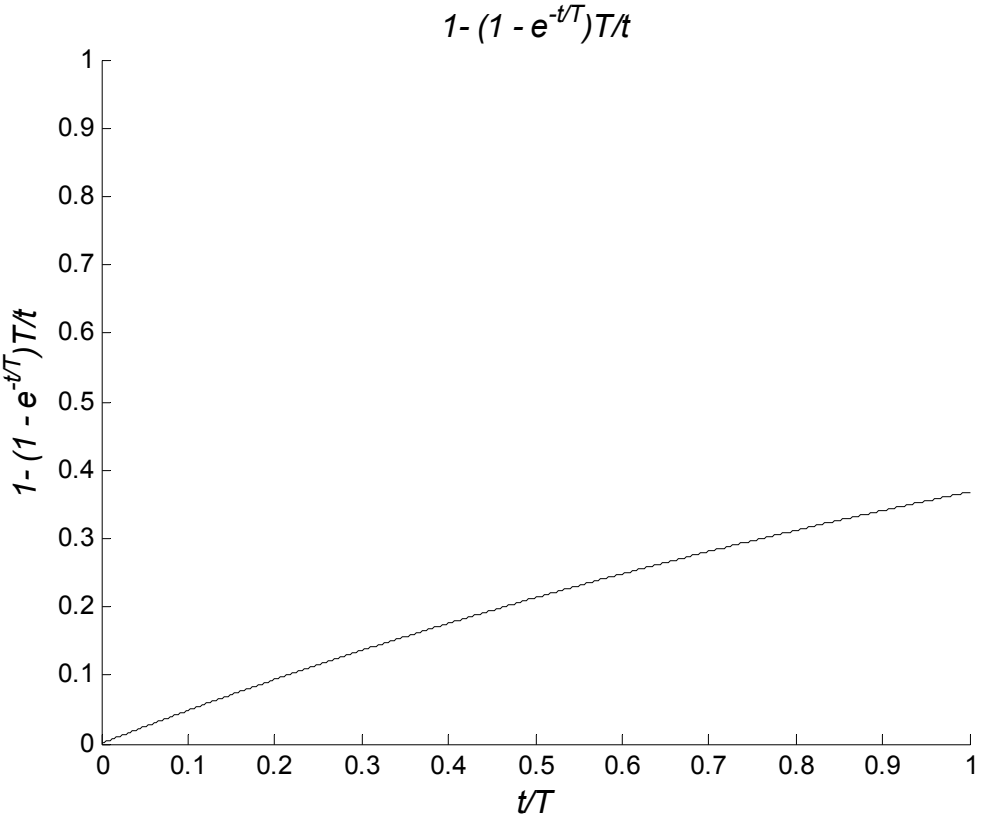
$$CO(t) = CO\ t / s \qquad (-) \qquad (7.10)$$

$$HbCO(t) = CO\ (t - (1 - e^{-t/T}) T) / s\ CO_{0.5} \qquad (-) \qquad (7.11)$$

Uttrycket (7.10) gäller bara för ett fall utan någon ventilation med en konstant tillförsel av kolmonoxid och utan några förluster. Uttrycket ger en överskattning jämfört med ett fall med ventilation. Faktorn $1 - (1 - e^{-t/T}) T / t$ redovisas i Figur 7.5 som funktion av kvoten t/T. En tillämpning av (7.11) görs för en exponeringstid lika med ramptiden $t = s$. Uttrycket (7.11) kan förenklas till följande för $t = s$:

$$HbCO(t) = CO\ (1 - (1 - e^{-t/T}) T / t) / CO_{0.5} \qquad (-) \qquad (7.12)$$

Några sifferexempel med (7.12) är med T = 378 min, $CO_{0.5}$ = 643 ppm och CO = 1000 ppm, vilket för exponeringstiderna 5, 10 och 15 min ger HbCO-andelarna 0.010, 0.020 respektive 0.030. Exakt beräkning enligt (2.11-14) ger samma resultat.



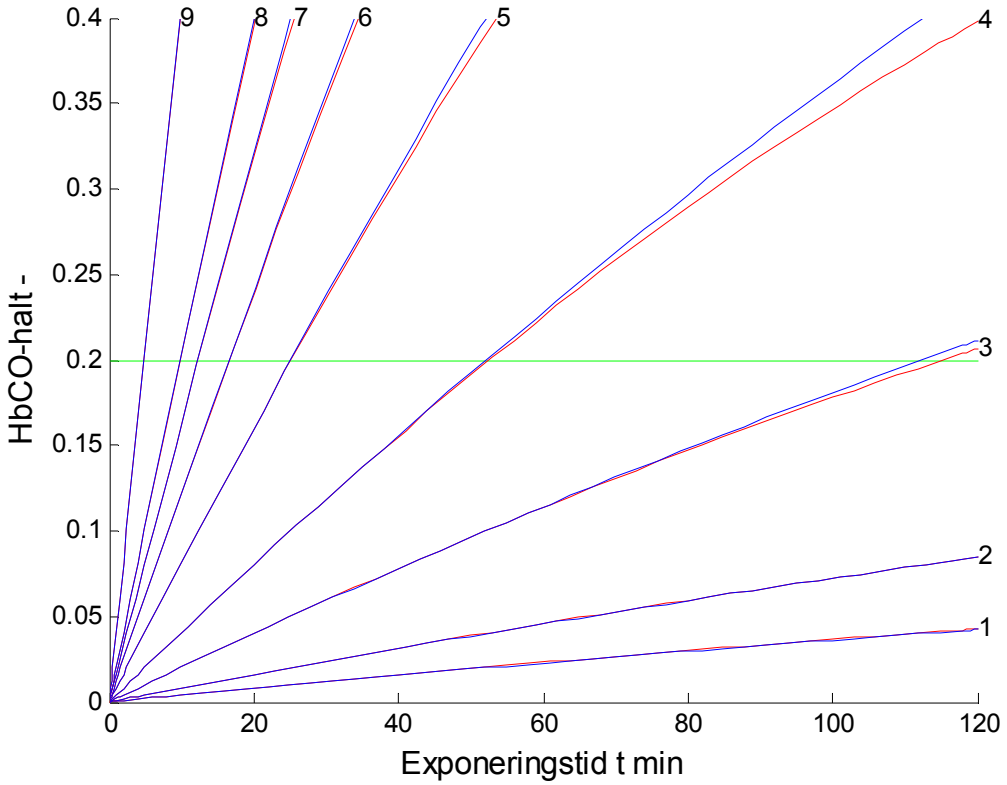
Figur 7.5 Faktorn $1 - (1 - e^{-t/T}) T / t$ som funktion av kvoten t/T.

Jämförelse mellan exakt och förenklad beräkning

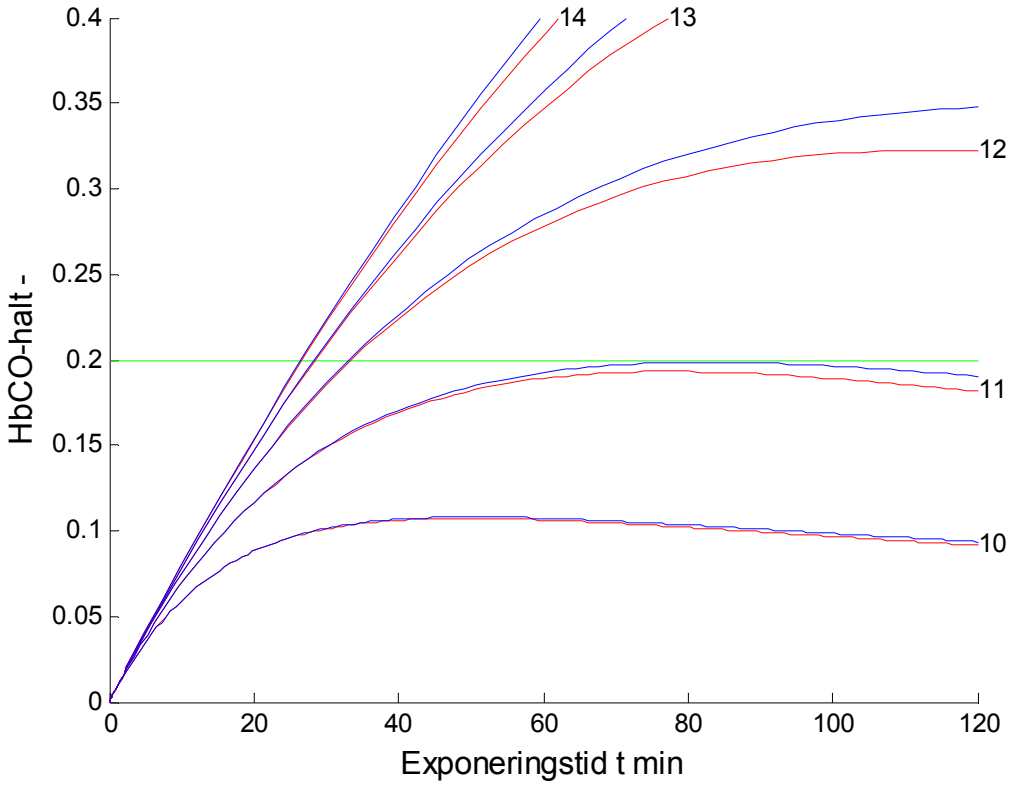
I detta underavsnitt görs en jämförelse mellan exakt och förenklad beräkning av HbCO-halt som funktion av exponeringstid från 0 till 120 min för både konstant och avklingande CO-halt. Valda tidsförlopp och startvärden för CO-halt *CO* i ppm, luftomsättningstid *S* i min, andningsflöde q_a i ml/min och Figur-nr redovisas i Tabell 7.1. Kurva för exakt beräkning markeras med fall nr som alltid ligger under motsvarande kurva för förenklad beräkning. Fall 5, 15 och 23 är identiska och likaså fall 12, 19 och 25. Samtliga kurvor för exakt och förenklad beräkning visar på små skillnader för HbCO < 0.3.

Tabell 7.1 Jämförelsefall

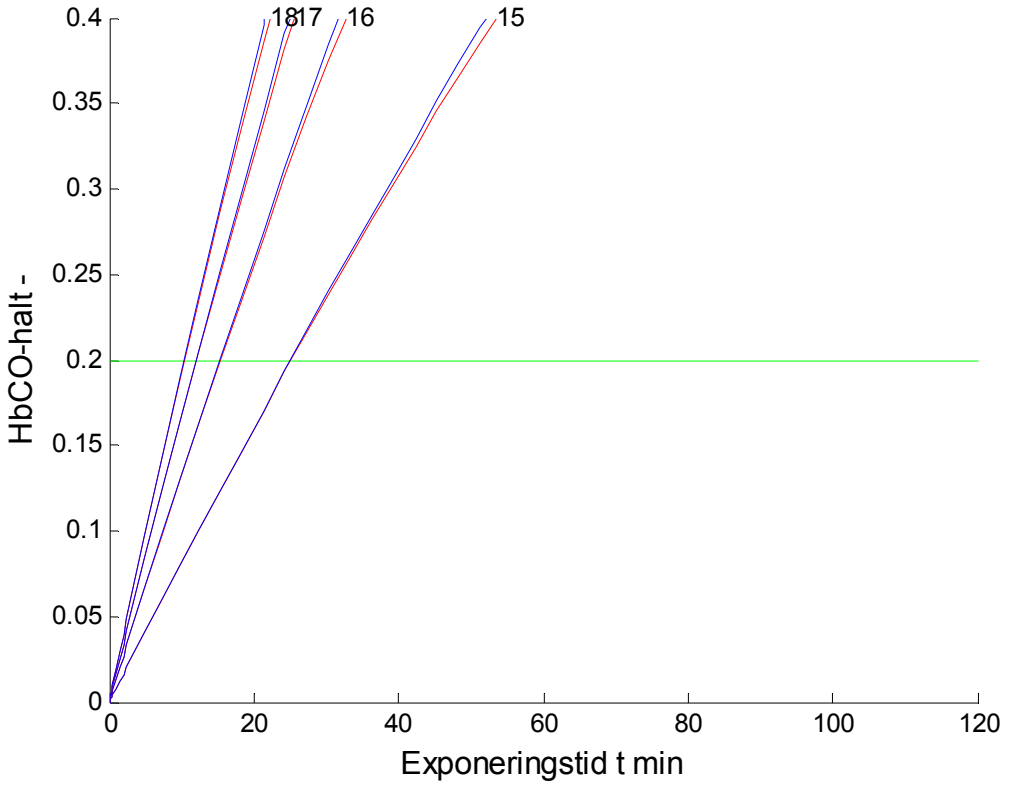
fall	typ	CO ppm	S min	q_a ml	HbCO(0) -	Figur
1	konstant	100	0	6000	0.0	7.6
2	konstant	200	0	6000	0.0	7.6
3	konstant	500	0	6000	0.0	7.6
4	konstant	1000	0	6000	0.0	7.6
5	konstant	2000	0	6000	0.0	7.6
6	konstant	3000	0	6000	0.0	7.6
7	konstant	4000	0	6000	0.0	7.6
8	konstant	5000	0	6000	0.0	7.6
9	konstant	10000	0	6000	0.0	7.6
10	avklingning	2000	15	6000	0.0	7.7
11	avklingning	2000	30	6000	0.0	7.7
12	avklingning	2000	60	6000	0.0	7.7
13	avklingning	2000	120	6000	0.0	7.7
14	avklingning	2000	240	6000	0.0	7.7
15	konstant	2000	0	6000	0.0	7.8
16	konstant	2000	0	12000	0.0	7.8
17	konstant	2000	0	18000	0.0	7.8
18	konstant	2000	0	24000	0.0	7.8
19	avklingning	2000	60	6000	0.0	7.9
20	avklingning	2000	60	12000	0.0	7.9
21	avklingning	2000	60	18000	0.0	7.9
22	avklingning	2000	60	24000	0.0	7.9
23	konstant	2000	0	6000	0.0	7.10
24	konstant	2000	0	18000	0.0	7.10
25	avklingning	2000	60	6000	0.0	7.10
26	avklingning	2000	60	18000	0.0	7.10
27	konstant	0	0	6000	0.1	7.11
28	konstant	0	0	6000	0.2	7.11
29	konstant	0	0	6000	0.3	7.11
30	konstant	0	0	6000	0.4	7.11



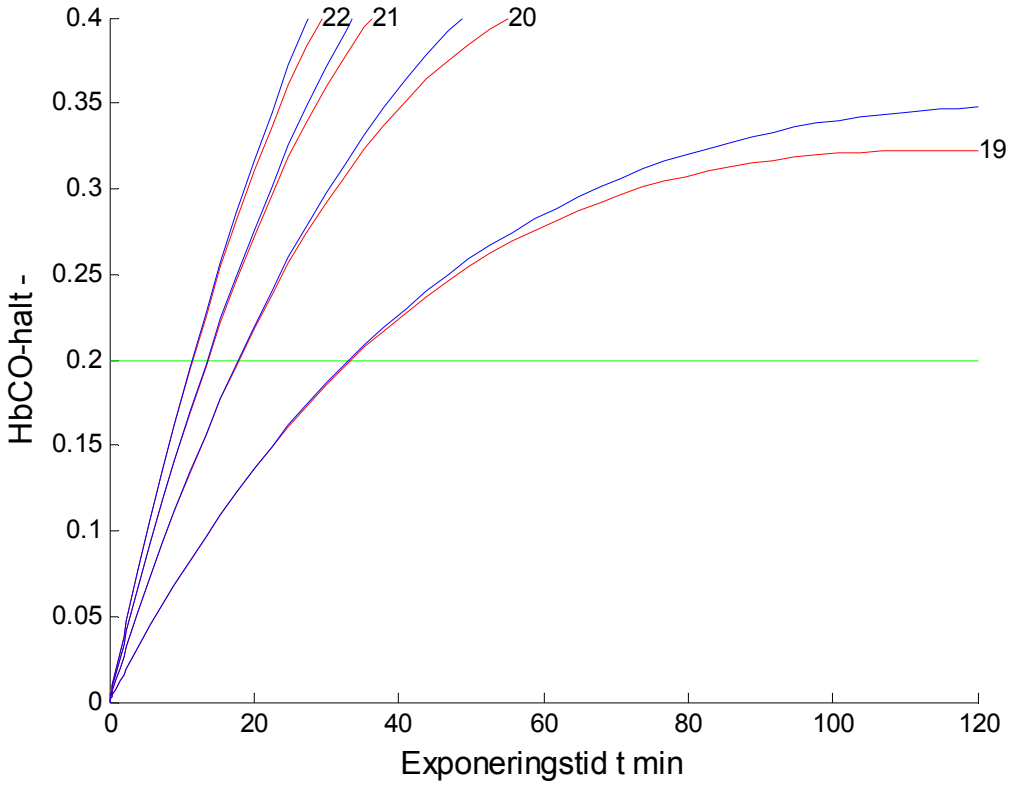
Figur 7.6 HbCO-halt exakt och förenklat för olika exponeringstid och fall 1-9.



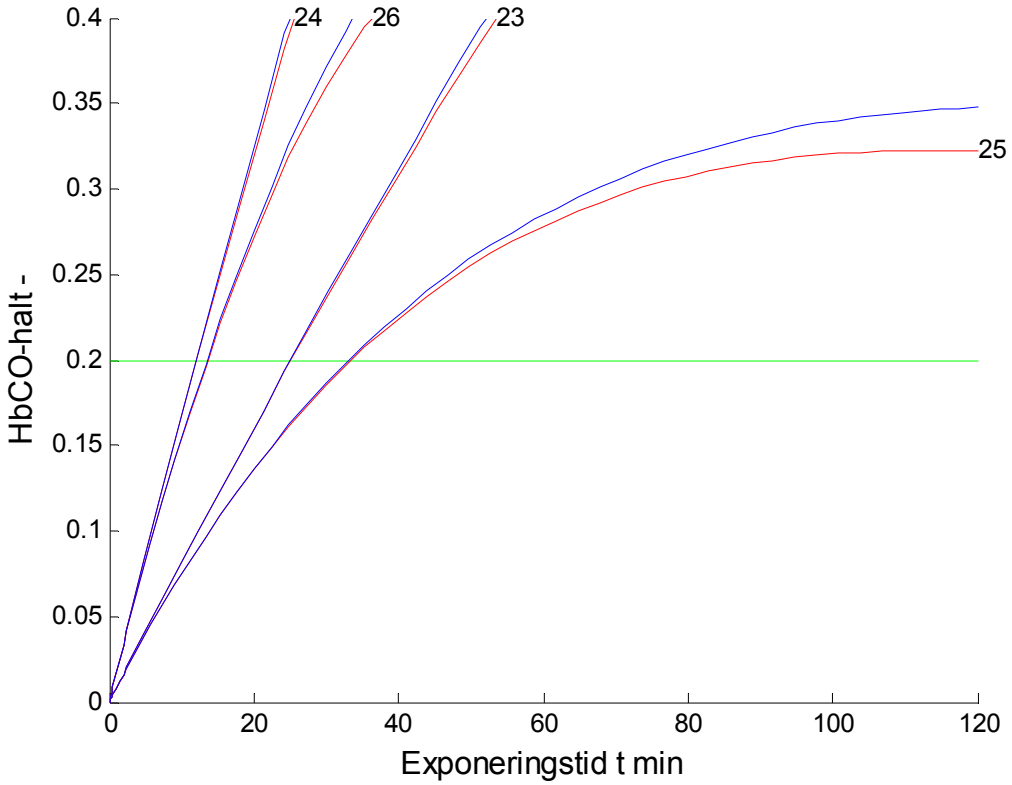
Figur 7.7 HbCO-halt exakt och förenklat för olika exponeringstid och fall 10-14.



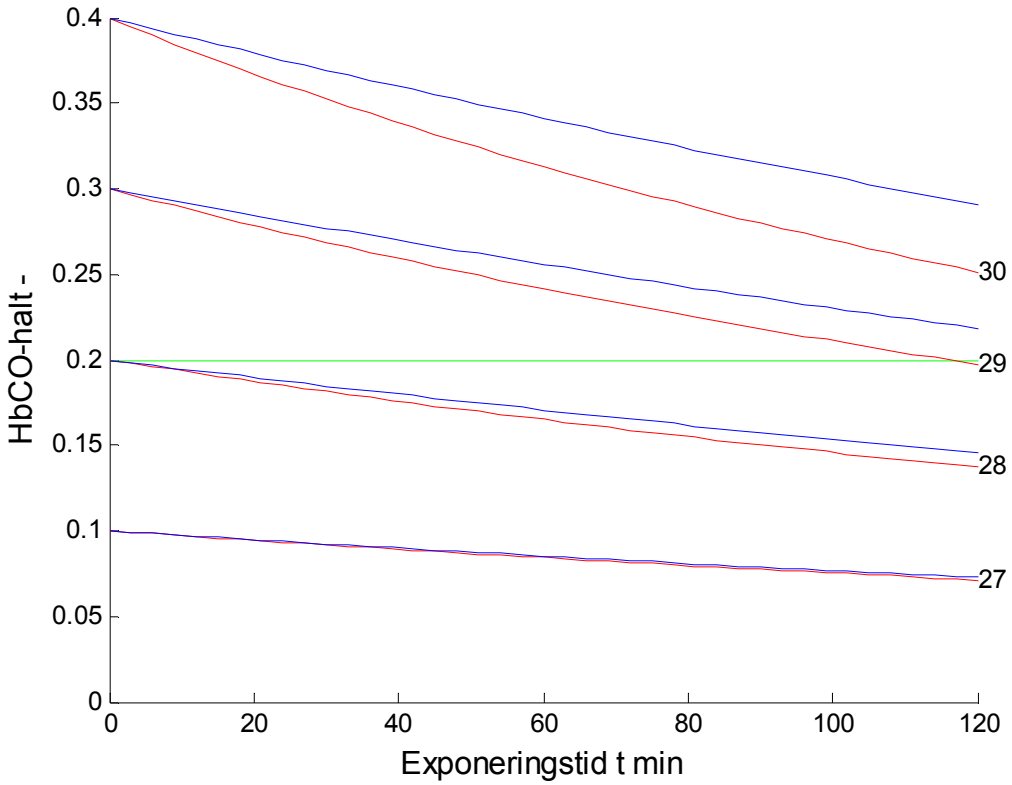
Figur 7.8 HbCO-halt exakt och förenklat för olika exponeringstid och fall 15-18.



Figur 7.9 HbCO-halt exakt och förenklat för olika exponeringstid och fall 19-22.



Figur 7.10 HbCO-halt exakt och förenklat för olika exponeringstid och fall 23-26.



Figur 7.11 HbCO-halt exakt och förenklat för olika exponeringstid och fall 27-30.

Jämförelse mellan CO-dos och förenklad beräkning

I detta underavsnitt görs en jämförelse mellan CO-dos och förenklad beräknings HbCO-värde under förutsättningen att HbCO < 0.2 för att rimlig noggrannhet skall bibehållas.

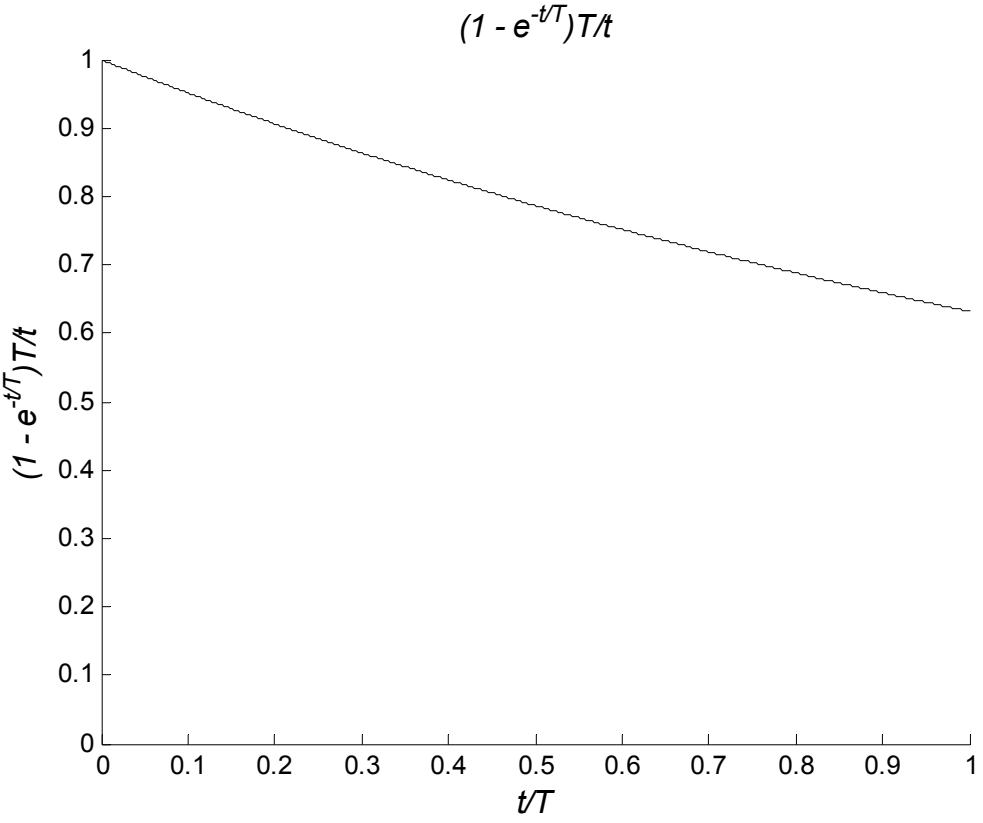
Kvoten mellan HbCO-värde och CO-dos för konstant CO-halt anges som $f_k(t)$ och kan skrivas som följer med utnyttjande av (7.6) och att CO-dosen är $CO\ t$ för exponeringstiden t, vilket efter viss inte fullständig förenkling ger:

$$f_k(t) = (1 - e^{-t/T})\ T / t\ CO_{0.5}\ T \qquad (\text{min}^{-1}) \qquad (7.13)$$

Det framgår av uttrycket (7.13) att kvoten mellan HbCO-värde och CO-dos är främst omvänt proportionell mot tidskonstanten T och proportionell mot faktorn $(1 - e^{-t/T})\ T / t$, som återges i Figur 7.12 som funktion av kvoten t/T.

Rimliga värden för kvoten t/T är klart mindre än ett. Ett enkelt sifferexempel med tidskonstanten T = 300 min och exponeringstiden t = 60 min ger kvoten t/T = 0.2 och värdet för faktorn $(1 - e^{-t/T})\ T / t$ blir omkring 0.9 enligt Figur 7.12.

Slutsatsen är att kvoten mellan HbCO-värde och CO-dos för konstant CO-halt är omvänt proportionell mot tidskonstanten T för HbCO-balansen.



Figur 7.12 Faktorn $(1 - e^{-t/T})\ T / t$ som funktion av kvoten t/T.

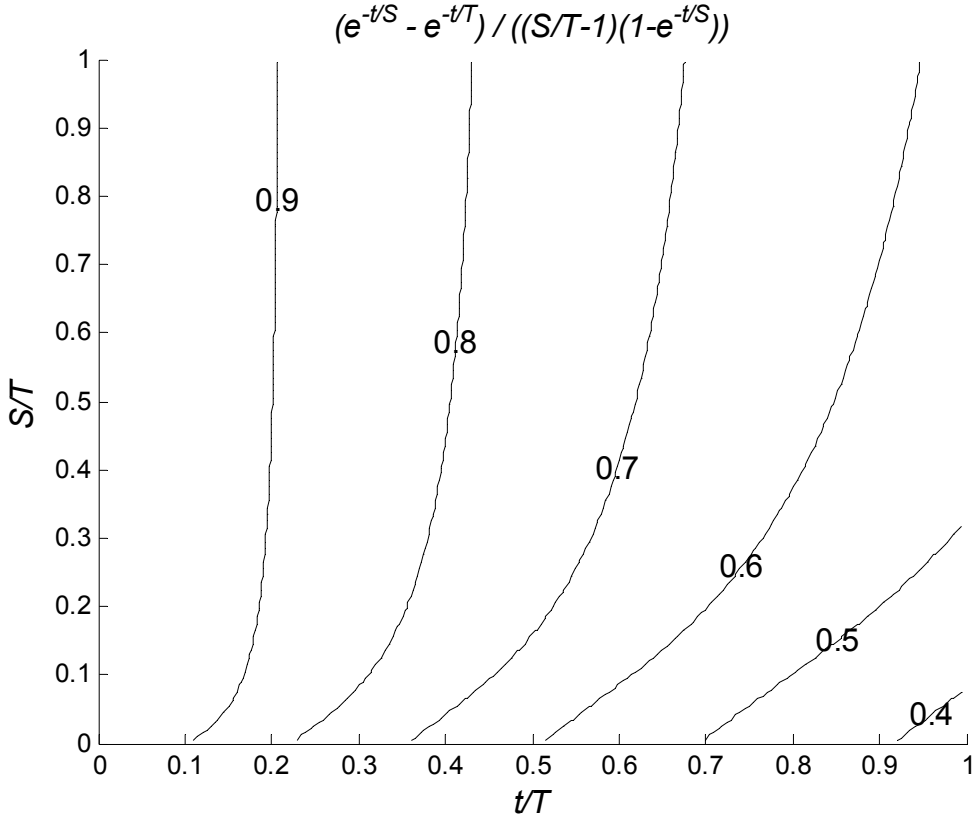
Kvoten mellan HbCO-värde och CO-dos för avklingande CO-halt anges som $f_a(t)$ och kan skrivas som följer med utnyttjande av (7.8) och att CO-dosen är $CO\ S\ (1 - e^{-t/S})$ för exponeringstiden t och viss förenkling ger:

$$f_a(t) = (e^{-t/S} - e^{-t/T}) / (S / T - 1) (1 - e^{-t/S})\ CO_{0.5}\ T \qquad (\text{min}^{-1}) \qquad (7.14)$$

Kvoten mellan HbCO-värde och CO-dos enligt (7.14) är omvänt proportionell mot tidskonstanten T och proportionell mot faktorn $(e^{-t/S} - e^{-t/T}) / (S / T - 1) (1 - e^{-t/S})$, som återges i Figur 7.13 som funktion av kvoten t/T och S/T.

Rimliga värden för kvoten t/T är klart mindre än ett. Ett enkelt sifferexempel med tidskonstanten T = 300 min och exponeringstiden t = 60 min ger kvoten t/T = 0.2. Ventilationens tidskonstant S är mindre än tidskonstanten för HbCO-balansen, vilket gör att kvoten $S/T < 1$. Värdet för faktorn $(e^{-t/S} - e^{-t/T}) / (S / T - 1) (1 - e^{-t/S})$ blir i stort sett > 0.9 enligt Figur 7.13.

Slutsatsen är att kvoten mellan HbCO-värde och CO-dos för avklingande CO-halt är omvänt proportionell mot tidskonstanten T för HbCO-balansen.



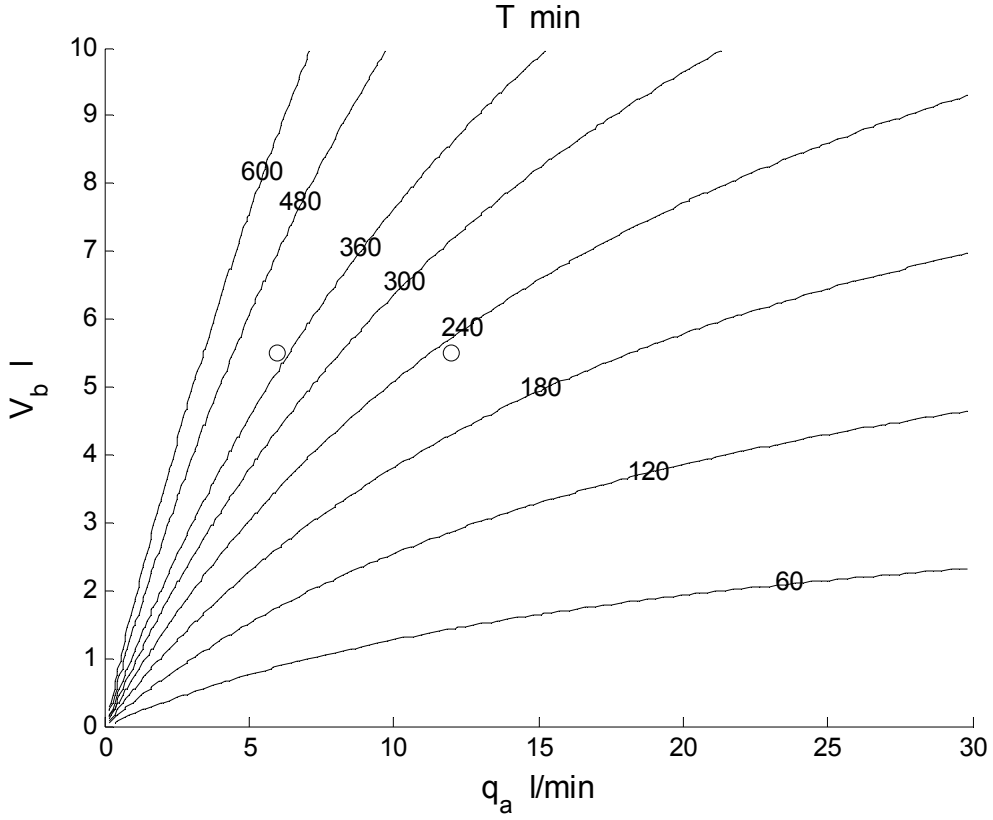
Figur 7.13 Faktorn $(e^{-t/S} - e^{-t/T}) / (S / T - 1) (1 - e^{-t/S})$ som funktion av kvoterna *t/T och S/T.*

De två uttrycken (7.13) för konstant CO-halt och (7.14) för avklingande CO-halt gör det möjligt att skatta HbCO-värdet för en given exponering och för en given tidskonstant T för HbCO-balansen. Den tidigare analysen visar att ett HbCO-värde kan beräknas med en given CO-dos CO_{dos} och en mindre reduktionsfaktor mindre än ett, men oftast nära ett. En mindre överskattning av värdet $HbCO$ fås genom att sätt reduktionsfaktorn till ett. De två uttrycken (7.13) och (7.14) kan skrivas om som följer till:

$$HbCO = CO_{dos} / CO_{0.5}\, T \qquad (-) \qquad (7.15)$$

Pararametern $CO_{0.5}$ är ganska väl bestämd enligt (2.13). Tidskonstanten T för HbCO-balansen är en funktion av flera parametrar enligt uttryck (7.3) och (2.3). En variabel är andningsflödet q_a som varierar med aktiviteten och kroppsstorlek. Andra variabler är blodvolymen V_b och diffusionskonstanten för lungorna D_{LCO}, vilka båda beror på kroppsstorlek. Denna tidskonstant T skall inte förväxlas med ventilationens tidskonstant eller luftomsättningstiden som anges med parametern S.

Hur tidskonstanten T enligt (7.3) beror på andningsflödet q_a och blodvolymen V_b redovisas i Figur 7.14 med isolinjer för tidskonstanten T. De fall som har använt i alla tidigare redovisade beräkningar anges med cirklar.



Figur 7.14 Tidskonstant T enligt (7.3) som funktion av andningsflöde och blodvolym.

8 Olika funktionskrav mot brandgasspridning

En sammanställning av nya och äldre funktionskrav från arbetsrapporten TVIT—07/7010 mot brandgasspridning görs i detta avsnitt för FT-system. Metodiken kan också tillämpas på godtycklig brandgasspridning genom olika former av läckage, vilket visas med principexempel 13-16 i avsnitt 9. Brandgasspridningen antas ske under kort tid och därefter sker utvädring med en avklingande föroreningsnivå. De funktionskrav som kommer att behandlas är först utspädning, nivå, siktsträcka, temperatur, dos och sist särskilt kolmonoxidförgiftning. Föroreningshalten kommer i fortsättningen att anges med enheten ppm för att redovisningen skall bli tydligare än om en absolut mer eller mindre sortlös föroreningsnivå hade valts.

Hjälpvariabler och parametrar

För att beräkna funktionskrav mot brandgasspridning med avseende på utspädning, nivå, siktsträcka, temperatur, dos och kolmonoxidförgiftning finns det fyra hjälpvariabler, vilka anger inverkan av exponeringstid, spridning via tilluft, volymspridning beroende på brandtemperatur när spridning börjar och slutar samt spridningstiden. Variablerna är följande:

$$s_e = 1 - e^{-t/S} \quad (-) \quad (8.1)$$

$$s_t = A_t / (A_t + A_f + A_i + A_y) \quad (-) \quad (8.2)$$

$$s_V = T_n / T_1 - T_n / T_2 \quad (-) \quad (8.3)$$

$$s_s = (1 - e^{-s/S}) S/s \quad (-) \quad (8.4)$$

där

s	spridningstid, s
t	exponeringstid, s
S	luftomsättningstid, s
A_t	läckagearea för tilluft, m^2
A_f	läckagearea för frånluft, m^2
A_i	läckagearea inåt, m^2
A_y	läckagearea utåt, m^2
T_n	temperatur för normalfallet, K
T_1	temperatur när brandgasspridning börjar, K
T_2	temperatur när brandgasspridning slutar, K

För samtliga funktionskrav sker tillämpning med basfallet från arbetsrapporten TVIT—07/7010, som också återfinns här i avsnitt 9. Följande data gäller för basfallet s_s=1 (spridningstiden försummas), s_t=0.2, s_V=0.5, V=72 m^3 och V_s=648 m^3.

Funktionskrav - utspädning

Ett möjligt funktionskrav kan vara att kräva en minsta utspädning av brandgaser som sprids. Utspädningen definieras med en faktor som med värdet ett anger ingen utspädning och som med värdet noll anger fullständig utspädning. Utspädningskravet kan skrivas som följer:

$$u_k > u = s_s \, s_t \, s_V \, V / V_s \qquad (-) \qquad (8.5)$$

där

u_k	högsta tillåtna utspädning, -
u	utspädningsfaktor, -

Högerledets täljare $s_s \, s_t \, s_V \, V$ i (8.5) anger den volym som spritts till nämnares volym V_s och finns där efter spridningstiden slut. Kvoten är lika med utspädningsfaktorn u, som är helt grundläggande för alla funktionskrav mot brandgasspridning. Utspädningsfaktorn u kommer i fortsättningen att ingå i alla beräkningsuttryck för olika funktionskrav mot brandgasspridning.

Det ovan redovisade funktionskravet som berör utspädning kan samtidigt vara ett sätt att beskriva effekten av irriterande brandgaser. Ett förslag kan vara att om utspädningensfaktorn u är mindre än ett givet värde antas det att brandgaskoncentrationen inte är dödligt irriterande.

Antag att kravet på utspädning är 1:100 eller 0.01. Tillämpning för basfallet ger enligt (8.5) en utspädningsfaktor u på $1 \cdot 0.2 \cdot 0.5 \cdot 648/72 = 0.011$ (0.1/9). Kravet är inte uppfyllt.

Funktionskrav - nivå

Nivåkravet kan skrivas som följer med tillämpning av utspädningsfaktorn u och medelföroreningsnivån c enligt nedan:

$$c_k > c_s = u \, c = s_s \, s_t \, s_V \, V \, c / V_s \qquad (\text{ppm}) \qquad (8.6)$$

där

c_k	högsta tillåtna föroreningsnivå, ppm
c_s	föroreningsnivå, ppm
c	medelföroreningnivå brandgaser, ppm

Produkten $s_t \, s_V \, V \, c$ anger den överförda föroreningsvolymen som blandas ut i den spridningsutsatta volymen V_s. Nivåkravsuttrycket förutsätter att den spridda kalla volymen är liten i förhållande till den mottagande volymen. Detta ger en överskattning av det beräknade nivåvärdet. Notera att lokalens ventilation inte påverkar föroreningsnivån c_s om spridningen sker under kort tid i förhållande till ventilationens luftomsättningstid S, vilket dock kan rättas med parametern s_s enligt samband (8.4).

Antag att nivåkravet är högst 150 ppm för kolmonoxid, vilket vid konstant och oändlig exponering ger HbCO-halten 0.2 motsvarande gränsen mellan lindrig och måttlig förgiftning. Insättning i (8.6) ger $c_s = 0.011 \cdot 30000 = 333$ ppm. Kravet är inte uppfyllt.

Funktionskrav - siktsträcka

Kravet är minst 10 m sikt i okända lokaler för den utrymmande och nertill 5 m i kända lokaler. Siktsträckan i en lokal är omvänt proportionell mot partikelmängden i luften. Detta innebär att om siktsträckan är känd för själva brandrummet kan siktsträckan beräknas för andra lokaler dir spridning har skett. Siktkravet kan skrivas som följer med samma variabler som för nivåkravet där nivå ersatts med den inverterande siktsträckan l^{-1} enligt nedan:

$$l_k < l_s = l / u = l\, V_s / s_s\, s_t\, s_V\, V \qquad \text{(m)} \qquad (8.7)$$

där

l_s	siktsträcka, m
l_k	lägsta tillåtna siktsträcka, m
l	siktsträcka i brandrum, m

Samma antagande som tidigare att spridningen sker under en kort tid varvid föroreningsnivån ökar till sitt högsta värde och att det är fullständig omblandning i de utsatta rummen eller brandcellerna.

Antag att siktsträckan i brandrummet är endast 0.2 m. Kravet är minst 10 m för hotell. Detta ger tillämpat på (8.7) att $l_s = 0.2 / 0.011 = 18$ m. Kravet är uppfyllt.

Funktionskrav - temperatur

Brandgasspridning leder inte till höga temperaturer i den utsatta eller de utsatta lokalerna. Avsikten är bara att visa att samma metodik kan även användas för att beräkna eller uppskatta temperaturökningen i andra lokaler. Den överförda energimängden kan räknat på den kalla volymens massa skrivas som:

$$E = \rho\, c_p\, s_t\, s_V\, V \Delta T \qquad \text{(J)} \qquad (8.8)$$

och omräknat för överföring till en annan kall volym utan att några värmeförluster och någon undanträngningseffekt tas med, vilket ger en överskattning, fås följande samband:

$$E = \rho\, c_p\, V_s \Delta T_s \qquad \text{(J)} \qquad (8.9)$$

Eliminering av den överförda energin ger efter förenkling temperaturkravet, vilket kan skrivas med samma variabler som för nivåkravet där nivå ersätts med temperaturökning enligt nedan:

$$\Delta T_k > \Delta T_s = u\, \Delta T = s_s\, s_t\, s_V\, V \Delta T / V_s \qquad \text{(ºC)} \qquad (8.10)$$

där

ΔT	temperaturökning i brandrum, ºC
ΔT_k	högsta tillåtna temperaturökning, ºC
ΔT_s	temperaturökning, ºC

Samma antagande som tidigare att spridningen sker under en kort tid varvid föroreningsnivån ökar till sitt högsta värde och att det är fullständig omblandning i de utsatta rummen eller brandcellerna.

Antag att temperaturökningen i brandrummet uppskattas till 360 ºC. Temperaturkravet antas vara högst 80 ºC och en högsta ändring sätts till 60 ºC. Detta ger tillämpat på (8.10) att $\Delta T_s = 0.011\ 360 = 4$ ºC. Kravet är uppfyllt.

Temperaturändringen kan tyckas obetydlig, men den avser hela den mottagande volymen med fullständig omblandning. Betydligt högre temperaturer kan uppnås lokalt för don nära taket med risk för antändning. Notera att den genomförda analysen bortser från alla värmeförluster och är därför överskattning bortsett från utblandningen i den mottagande volymen.

Funktionskrav - dos

Doskravet kan skrivas med samma variabler som för nivåkravet tidigare utökat med korrektion för exponeringstiden s_e och luftomsättningstiden S enligt nedan:

$$C_k > C_s = s_e\, u\, c\, S = s_e\, s_s\, s_t\, s_V\, V\, c\, /\, q_s \qquad \text{(ppms)} \qquad (8.11)$$

där

C_k	högsta tillåtna föroreningsdos, ppms
C_s	föroreningsdos, ppms
c	medelföroreningnivå brandgaser, ppm
S	luftomsättningstid hos mottagande volym, s

Luftomsättningstiden S för den mottagande volymen är kvoten mellan den mottagande volymen V_s och dess ventilationsflöde q_s, vilket ger dimensionen tid. Om den normala ventilationen stoppas blir ventilationsflödet lika med infiltrationsflödet, vilket kan vara litet i förhållande till det normala ventilationsflödet. Luftomsättningstiden S blir i ett sådant fall mycket stor. Notera att luftomsättningstiden ingår även i beräkning av reduktionsfaktorn s_e för exponering enligt (8.1).

Samma antagande som tidigare att spridningen sker under en kort tid varvid föroreningsnivån ökar till sitt högsta värde och att det är fullständig omblandning i de utsatta rummen eller brandcellerna. Produkten $s_t\, s_V\, V\, c$ anger den överförda föroreningsvolymen som blandas ut i den spridningsutsatta volymen q_s. Doskravsuttrycket förutsätter att den spridda kalla volymen är liten i förhållande till den mottagande volymen. Detta ger en överskattning av dosvärdet.

Antag att kravet är 15000 ppmmin för kolmonoxid. Tillämpning för basfallet med (8.11), oändlig exponering och luftomsättningstiden 30 min ger att $C_s = 1 \cdot 0.011 \cdot 30000 \cdot 30 = 10000$ ppmmin. Kravet är uppfyllt.

Funktionskrav - kolmonoxidförgiftning

Kolmonoxidförgiftning beräknas med en olinjär ekvation enligt (2.9), men kan för lindrig förgiftning beräknas med en förenklad linjär ekvation (7.2) som överskattar förgiftningen beräknad med (2.9). Det finns ett samband mellan CO-dos och CO-förgiftning eller HbCO-halten enligt (7.15), vilket överskattar förgiftningen för en given dos och återges nedan.

$$HbCO = CO_{dos} / CO_{0.5}\ T \qquad (-) \qquad (7.15)$$

Parametern T är tidskonstanten för kolmonoxidupptagning i blodet. Den är beroende på kroppsstorlek och aktivitet. Uttrycket (7.15) kan användas för att bestämma en kolmonoxid-dos som högst kan ge lindriga symptom, vilket är en HbCO-halt lägre än 0.2. Dosen för kolmonoxid CO_{dos} ges av (8.11). Omskrivning av (7.15) och med insättning av (8.11) ger följande:

$$HbCO_k > s_e\ u\ c\ S / CO_{0.5}\ T \qquad (-) \qquad (8.12)$$

Antag att kravet på kolmonoxidförgiftning är lindrig förgiftning med en viss marginal till måttlig förgiftning. Gränsvärdet anges som $HbCO_k$ = 0.1. Nya parametrar utöver basfallets är tidskonstanten för en person i vila T = 360 min och parametern $CO_{0.5}$ = 600 ppm. Detta ger tillämpat på (8.12) följande $HbCO_s$ = 1 0.011 30000 30 / 600 360 = 5 /108 = 0.046. Kravet är uppfyllt.

Uppskattning med högsta nivåvärde 333 ppm och ingen utvädring kan inte användas för att avgöra om förgiftningen är ofarlig. HbCO-halten vid jämvikt för 333 ppm blir enligt (1.1) 0.357.

Sammanställning olika funktionskrav

Samtliga funktionskrav sammanställs nedan för att visa likheterna och för att ge en bra överblick.

$$u_k > u = [\ s_s\ s_t\ s_V\ V / V_s\ ] \qquad (-) \qquad (8.5)$$

$$c_k > c_s = u\ c \qquad (ppm) \qquad (8.6)$$

$$l_k < l_s = l / u \qquad (m) \qquad (8.7)$$

$$\Delta T_k > \Delta T_s = u\ \Delta T \qquad (ºC) \qquad (8.10)$$

$$C_k > C_s = s_e\ u\ S\ c \qquad (ppms) \qquad (8.11)$$

$$HbCO_k > s_e\ u\ c\ S / CO_{0.5}\ T \qquad (-) \qquad (8.12)$$

9 Principexempel för FT-system

Ett antal principexempel har tidigare redovisats i arbetsrapporten TVIT—07/7010 och Handboken (2008). Samma fall kompletteras här med beräkning av kolmonoxidförgiftning för en vuxen person i vila. Ett hotell med FT-ventilerade tio gästrum undersöks. Exponeringstiden antas vara oändlig om inte annat anges. Brandtemperaturen antas högst bli 600 K. Normal- och starttemperatur är 300 K.

Tabell 9.1 Beskrivning av tillämpningsexempel

fall	beskrivning
0	basfall
1	ventilationssystem med återluft 0.2 och samma ventilationsflöde som för basfallet
2	underluft till korridor genom en extra läckarea om 80 cm^2 mellan dörr och tröskel
3	nervarvad ventilation med halverat ventilationsflöde
4	nerstrypt ventilation med halverat ventilationsflöde och halverade donareor
5	kort uppehållstid 30 min
6	variabelt tilluftsdon som vid brand minskar donarean till 5.66 cm^2.
7	variabelt frånluftsdon som vid brand ökar donarean från 16 till 64 cm^2
8	forcerad ventilation vid brand genom att ventilationsflödet ökar till 0.27 m^3/s
9	ändrade dontryckfall till 360 Pa (tilluft) och 40 Pa (frånluft) och dito areor 8 och 24 cm^2
10	tryckavlastning med en effektiv öppning med arean 720 cm^2
11	sprinklat med starttemperatur 300 K och sluttemperaturen 400 K
12	sprinklat med starttemperatur 400 K och sluttemperaturen 500 K och CO-halt 0.05
13	luftläckage till annat hotellrum 3.2 cm^2 utav inre och yttre läckage om 48 cm^2
14	luftläckage till hotellrum som fall 13 och backspjäll i tilluft
15	luftläckage till hotellrum som fall 13 och brandgasspjäll i både tilluft och frånluft
16	luftläckage till korridor med volymen 180 m^3 och flödet 0.030 m^3/s som fall 2
17	stoppad ventilation efter brandgasspridning endast infiltrationsflöde om 0.03 m^3/s
18	ingen fördelningslåda, spridning till ett rum och stängd frånluft i brandrum
19	ingen fördelningslåda, spridning till ett rum och stängd tilluft med läckarea om 1 cm^2
20	spridning till ett rum
21	spridning till två rum
22	spridning till tre rum
23	spridning till fyra rum
24	spridning till fem rum
25	spridning till femton rum

Ett gästrums längd, bredd och höjd antas vara 6, 4 respektive 3 m, vilket ger en volym på 72 m^3 och en total omslutande yta på 108 m^2. Detta ger en luftomsättningstid på 3600 s. Både tilluftsdon och frånluftsdon antas ha dontryckfallet 90 Pa. Detta ger en effektiv läckarea på 16 cm^2 per don om dontryckfallet jämställs med tryckfallet för fri utströmning. Hotellrummets läckarea till omgivningen antas vara 48 cm^2, vilket kan räknas om till ett specifikt läckage på 0.4 l/sm^2 omslutande yta. Spridningsandel för tilluft s_t kan beräknas till 0.2 (16/(16+16+48)). En del läckareor och temperaturer har valts för att lämpliga siffervärden på spridningsandel respektive volymandel.

Tabell 9.2 Läckageareor och spridningsandel s_t för olika fall

fall	beskrivning	A_t cm^2	A_f cm^2	A_{iy} cm^2	s_t -
0	basfall	16	16	48	0.20
1	basfall med återluft	16	16	48	0.20
2	underluft till korridor	16	16	128	**0.10**
3	nervarvad ventilation	16	16	48	0.20
4	nerstrypt ventilation	**8**	**8**	48	**0.125**
5	kort uppehållstid	16	16	48	0.20
6	variabelt tilluftsdon	**5.56**	16	48	**0.08**
7	variabelt frånluftsdon	16	**64**	48	**0.125**
8	forcerad ventilation	16	16	48	0.20
9	ändrade dontryckfall	**8**	**24**	48	**0.10**
10	tryckavlastning	16	16	768	**0.02**
11	sprinklat	16	16	48	0.20
12	sprinklat (CO-halt 0.05 CO)	16	16	48	0.20
13	luftläckage 3.2 cm^2 till hotellrum	16	16	48	**0.04**
14	luftläckage 3.2 cm^2 till hotellrum och backspjäll	16	16	48	**0.05**
15	luftläckage 3.2 cm^2 till hotellrum och brandgasspjäll	16	16	48	**0.067**
16	luftläckage 80 cm^2 till korridor	16	16	**128**	**0.50**
17	stoppad ventilation	16	16	48	0.20
18	utan fördelningslåda och stängd frånluft	16	**0**	48	**0.25**
19	utan fördelningslåda och stängd tilluft	**1**	16	48	**0.015**
20	spridning till ett rum	16	16	48	0.20
21	spridning till två rum	16	16	48	0.20
22	spridning till tre rum	16	16	48	0.20
23	spridning till fyra rum	16	16	48	0.20
24	spridning till fem rum	16	16	48	0.20
25	spridning till femton rum	16	16	48	0.20

I arbetsrapporten TVIT—7/7010 angavs kolmonoxiddosen 30 000 ppmmin som dödlig. Detta är inte helt korrekt, eftersom kolmonoxidförgiftning beror på kroppsstorlek och aktivitet. Dosen 30 000 ppmmin kan skrivas om i absoluta tal till 1.8 COs. Brandgasernas medelkolmonoxidhalt under spridningsfasen är 0.03 eller 30000 ppm. Nedan redovisas i Tabell 9.3 förutom olika hjälpparametrar COdos, högsta CO-halt och högsta HbCO-halt enligt exakt beräkning.

Siffrorna i Tabell 9.3 visar HbCO-halten är större än 0.2 i endast fyra fall medan den relativa CO-dosen är större än 1.8 COs i tio fall.

Tabell 9.3 Hjälpparametrar och beräknad kolmonoxiddos och högsta kolmonoxidnivå samt högsta HbCO-halt för fall från TVIT—07/7010

fall	s_e	s_t	s_V	q_s	V_s	C_s	c_s	*HbCO*
	-	-	-	m^3/s	m^3	COs	ppmCO	-
0	1.0	0.20	0.50	0.18	648	1.20	333	0.0581
1	1.0	0.20	0.50	**0.144**	648	1.50	333	0.0686
2	1.0	**0.10**	0.50	0.18	648	0.60	167	0.0296
3	1.0	0.20	0.50	**0.09**	648	2.40	333	0.0948
4	1.0	**0.125**	0.50	**0.09**	648	1.50	208	0.0602
5	**0.4**	0.20	0.50	0.18	648	0.48	333	0.0312
6	1.0	**0.08**	0.50	0.18	648	0.48	133	0.0238
7	1.0	**0.125**	0.50	0.18	648	0.75	208	0.0368
8	1.0	0.20	0.50	**0.27**	648	0.80	333	0.0423
9	1.0	**0.10**	0.50	0.18	648	0.60	167	0.0296
10	1.0	**0.02**	0.50	0.18	648	0.12	33	0.0065
11	1.0	0.20	**0.25**	0.18	648	0.60	167	0.0296
12	1.0	0.20	**0.15**	0.18	648	0.60	167	0.0296
13	1.0	**0.04**	0.50	**0.02**	**72**	2.16	600	0.1031
14	1.0	**0.05**	0.50	**0.02**	**72**	2.70	750	0.1280
15	1.0	**0.067**	0.50	**0.02**	**72**	3.60	1000	0.1688
16	1.0	**0.50**	0.50	**0.03**	**180**	18.00	3000	0.5890
17	1.0	0.20	0.50	**0.03**	648	7.20	333	0.1724
18	1.0	**0.25**	0.50	**0.02**	**72**	13.50	3750	0.5475
19	1.0	**0.015**	0.50	**0.02**	**72**	0.83	231	0.0406
20	1.0	0.20	0.50	**0.02**	**72**	10.80	3000	0.4585
21	1.0	0.20	0.50	**0.04**	**144**	5.40	1500	0.2475
22	1.0	0.20	0.50	**0.06**	**216**	3.60	1000	0.1688
23	1.0	0.20	0.50	**0.08**	**288**	2.70	750	0.1280
24	1.0	0.20	0.50	**0.10**	**360**	2.16	600	0.1031
25	1.0	0.20	0.50	**0.30**	**1080**	0.72	200	0.0353

Samma fall som i Tabell 9.3 har även redovisats i Handboken (2008) med den enda skillnaden att brandgasernas medelkolmonoxidhalt under spridningsfasen är 0.01 eller 10000 ppm. Nedan redovisas i Tabell 9.4 förutom olika hjälpparametrar COdos, högsta CO-halt och högsta HbCO-halt enligt exakt beräkning.

Siffrorna i Tabell 9.4 visar HbCO-halten är större än 0.2 i endast två fall medan den relativa CO-dosen är större än 1.8 i fyra fall. Siffrorna för dos och nivå är givetvis en tredjedel av de i Tabell 9.3. Siffrorna för HbCO-halt är nästan en tredjedel av de i Tabell 9.3, eftersom beräkning skett med exakt och olinjär modell.

Tabell 9.4 Hjälpparametrar och beräknad kolmonoxiddos och högsta kolmonoxidnivå samt högsta HbCO-halt för fall från Handboken (2008)

fall	s_e	s_t	s_V	q_s	V_s	C_s	c_s	$HbCO$
	-	-	-	m^3/s	m^3	COs	ppmCO	-
0	1.0	0.20	0.50	0.18	648	0.4000	111	0.0200
1	1.0	0.20	0.50	**0.144**	648	0.5000	111	0.0236
2	1.0	**0.10**	0.50	0.18	648	0.2000	56	0.0104
3	1.0	0.20	0.50	**0.09**	648	0.8000	111	0.0328
4	1.0	**0.125**	0.50	**0.09**	648	0.5000	69	0.0210
5	**0.4**	0.20	0.50	0.18	648	0.1574	111	0.0105
6	1.0	**0.08**	0.50	0.18	648	0.1599	44	0.0084
7	1.0	**0.125**	0.50	0.18	648	0.2500	69	0.0128
8	1.0	0.20	0.50	**0.27**	648	0.2667	111	0.0145
9	1.0	**0.10**	0.50	0.18	648	0.2000	56	0.0104
10	1.0	**0.02**	0.50	0.18	648	0.0400	11	0.0028
11	1.0	0.20	**0.25**	0.18	648	0.2000	56	0.0104
12	1.0	0.20	**0.15**	0.18	648	0.6000	167	0.0296
13	1.0	**0.04**	0.50	**0.02**	**72**	0.7200	200	0.0353
14	1.0	**0.05**	0.50	**0.02**	**72**	0.9000	250	0.0439
15	1.0	**0.067**	0.50	**0.02**	**72**	1.2000	333	0.0581
16	1.0	**0.50**	0.50	**0.03**	**180**	6.0000	1000	0.2382
17	1.0	0.20	0.50	**0.03**	648	2.4000	111	0.0617
18	1.0	**0.25**	0.50	**0.02**	**72**	4.5000	1250	0.2086
19	1.0	**0.015**	0.50	**0.02**	**72**	0.2769	77	0.0141
20	1.0	0.20	0.50	**0.02**	**72**	3.6000	1000	0.1688
21	1.0	0.20	0.50	**0.04**	**144**	1.8000	500	0.0864
22	1.0	0.20	0.50	**0.06**	**216**	1.2000	333	0.0581
23	1.0	0.20	0.50	**0.08**	**288**	0.9000	250	0.0439
24	1.0	0.20	0.50	**0.10**	**360**	0.7200	200	0.0353
25	1.0	0.20	0.50	**0.30**	**1080**	0.2400	67	0.0123

10 Sammanfattning och tillämpning

Rapportens resultat och slutsatser sammanfattas som följer. Denna arbetsrapport är en rättelse av tre arbetsrapporter TVIT—07/7010, TVIT—07/7014 och TVIT—08/7025. Kolmoxid-förgiftning beräknades med två antagande för att beskriva lungornas funktion enligt nedan.

- Jämviktssamband mellan blodets HbCO-halt och luftens CO-halt enligt (1.1)
- Fullständig gasupptagning för blodet motsvarar 0.04 av luftens gashalt.

Kontroll har skett med olika referenser. Det första antagandet för jämviktssambandet mellan blodets HbCO-halt och luftens CO-halt enligt (1.1) har kontrollerats med data från Stewart (1974) och parametern $CO_{0.5}$ bestämdes till 600 ppm mot tidigare 640 ppm. De tre HbCO-gränsvärdena mellan för lindrig, måttlig, allvarlig och dödlig kolmonoxidförgiftning är lika med 0.2, 0.4 respektive 0.6, vilket motsvaras av CO-halterna 150, 400 respektive 900 ppm mot tidigare angivna 160, 427 respektive 960 ppm.

Det andra antagandet att lungornas gasupptagningsförmåga är 0.04 av luftens gashalt var klart i överkant. Valet av 0.04 gjordes på grundlag av att syreupptagningsförmågan är 0.04 av luftens gashalt. Felet innebar att HbCO-halten överskattades för korta exponeringar, men inte för långvariga exponeringar med jämvikttillstånd.

En korrekt modellering av lungornas gasupptagningsförmåga återfinns i referens R. F. Coburn, R. E. Forster och P. B. Kane (1965). Modellen enligt (2.1) kan omformas till en balansekvation för blodets HbCO-halt enligt (2.9).

Modellen kan förenklas ytterligare till ett explicit beräkningsuttryck HbCO-halter < 0.2, vilket redovisas i avsnitt 7. Förenklingen innebär att lindrig kolmonoxidförgiftning kan beräknas med (7.2) direkt utan någon form av iterativa beräkningar med god noggrannhet för fall med konstant, avklingande eller linjärt ökande CO-halt enligt beräkningsuttrycken (7.6), (7.8) respektive (7.11). Det går att förenkla dessa beräkningar med en mindre överskattning av HbCO-halten enligt (7.15), vilket innebär att HbCO-värdet är proportionellt mot CO-dosen och omvänt pro-portionellt mot tidskonst-anten för HbCO-balansen enligt (7.3). Nackdelen är att CO-dosen måste beräknas för att beräkna HbCO-värdet. En viktig slutsats med (7.15) är att proportionalitetskonstanten mellan HbCO-värde och CO-dos är lika med $1/ CO_{0.5}\, T$, där $CO_{0.5}$ är en konstant enligt (2.13) och T är HbCO-balansens tidskonstant enligt (7.3), vilken påverkas av kroppstorlek och andningsflöde.

Exponering med konstant CO-halt i avsnitt 3, avklingande CO-halt i avsnitt 4 och 6, linjär ökande CO-halt i avsnitt 5 visar att HbCO-halten blir lägre än tidigare beräknat i arbets-rapporterna TVIT—07/7014 och TVIT—08/7025. Det finns nu en god proportionalitet mellan HbCO-värde och CO-dos för alla redovisade tabellfall med startvärde noll för HbCO-värdet. Den förenklade beräkning med modellen (7.2) ger också god noggrannhet för HbCO-värden < 0.2 jämfört med den exakta fullständiga modellen enligt (2.9).

Det skall också påpekas att dosen 30000 ppmmin har angetts som dödlig i arbetsrapporten TVIT—07/7010, men detta är fel. Kroppsstorlek och aktiviteten har stor betydelse.

Mångfalden av diagram redovisade i avsnitt 3-6 togs ursprungligen fram för det fanns inget enkelt sätt att bedöma kolmonoxidförgiftning med enbart CO-dosen. Den rättade exakta beräkningsmodellen och även den förenklade beräkningsmodellen visar nu att det finns en proportionalitet. Alla diagrammen i avsnitt 3-6 kan användas mer som exempel än för direkt avläsning av olika värden. Diagrammen täcker ju inte heller alla möjliga fall, men det gör de förenklade beräkningarna i avsnitt 7 för HbCO-halter < 0.2.

Ett helt brandgasspridningsscenario består av en spridningsfas följt av en utvädringsfas. Det totala HbCO-värdet och CO-dosen kan uppskattas genom att summera det två fasernas värden från avsnitt 4 respektive 5 eller 7. Denna summering innebär en mindre överskattning, eftersom CO-startvärdet för avklingningsfasen är lägre på grund av ventilation än det slutvärde som gäller för spridningsfasens beräkning. Något som ökar överskattningen är att avklingningsfasen i avsnitt 5 startar med HbCO-halt noll, men med ett HbCO-värde större än noll efter spridningsfasen minskar detta kolmonoxidupptagningen hos blodet.

Ett viktigt påpekande är att kolmonoxidförgiftning påverkar olika beroende på aktivitet. En person med hög aktivitet påverkas mer vid lägre HbCO-halt än en sovande person. Detta innebär att om en sovande person vaknar kan HbCO-halten vara för hög för den aktivitet som krävs för att utrymma på egen hand. Risken är stor att den uppvaknade personen förlorar medvetandet. En person med hög aktivitet begränsas påtagligt av HbCO-halten 0.2. Ett lämpligt gränsvärde kan därför vara $HbCO_{max} = 0.1$.

Bedömning av skyddskravet mot kolmonoxidförgiftning kan ske med Tabell 8.1 nedan. Förutsumma spridningstiden och räkna endast med avklingningsförloppet. Beräkna startvärdet för CO-halten *CO* med metod beskriven i arbetsrapport TVIT—07/7010. Bestäm tidskonstanten *T* för HbCO-balansen, ventilationens luftomsättningstid *S* och exponeringstiden *t*. Detta ger fyra indata *CO, T, S* och *t* med sorterna -, min, min och min. Okända värden markeras som ?.

Någon beräkning av HbCO-halt behöver inte alltid göras, eftersom för låga startvärden *CO* kan något av test 1-3 vara tillräckligt. Notera att högsta HbCO-värde kan uppnås före exponeringstidens slut för avklingningsförlopp enligt test 6-9.

Tabell 8.1 Sammanställning för skyddskrav mot kolmonoxidförgiftning

test	t_{indata} min	t_{formel} min	S min	skyddskrav uppfyllt om
1	?	-	?	$CO < CO_{0.5}/9$ om $HbCO_{max} = 0.1$
2	?	-	?	$CO < CO_{0.5}/4$ om $HbCO_{max} = 0.2$
3	?	-	?	$CO < CO_{0.5}/(1/HbCO_{max} - 1)$
4	?	∞	?	$HbCO(t_{formel})_{(7.6)} < HbCO_{max}$
5	t	t	?	$HbCO(t_{formel})_{(7.6)} < HbCO_{max}$
6	?	$t_{max(7.9a)}$	S	$HbCO(t_{formel})_{(7.8a)} < HbCO_{max}$
7	t	$min(t, t_{max(7.9a)})$	S	$HbCO(t_{formel})_{(7.8a)} < HbCO_{max}$
8	?	T	$S = T$	$HbCO(t_{formel})_{(7.8b)} < HbCO_{max}$
9	t	$min(t,T)$	$S = T$	$HbCO(t_{formel})_{(7.8b)} < HbCO_{max}$

Referenser

Coburn, R. F., Forster, R. E. och Kane, P. B. Considerations of the physiological variables that determine the blood carboxyhemoglobin concentrations in man, Journal of Clinical Investigation Vol. 44, No. 11, pp 1899-1910, (1965)

Fire engineering guidelines (1995)

Handboken (2008) Installationsbrandskydd, Ventilation – Rör – El, Brandskyddslaget

Jensen, L., Funktionskrav mot brandgsspridning mellan brandceller via ventilationssystem – en förstudie med principexempel, Rapport TVIT—07/7010 (2007)

Jensen, L., Kolmonoxidförgiftning – principexempel, Rapport TVIT—07/7014 (2007)

Jensen, L., Förgiftning vid avklingande kolmonoxidhalt, Rapport TVIT—08/7025 (2008)

Milke J. A., Hugue D. E., Hoskins B. L., Carroll J. P.
Tenability Analyses in Performance-Based Design.
Fire Protection Engineering September 22, (2005)

Nelson G. L.
Carbon Monoxide and Fire Toxicity: A Review and Analysis of Recent Work.
Fire Technology, Vol 34, No 1 (1998)

NFPA 101, Life Safety Code (2009)

NFPA 5000 NFPA building Code
Technical Committee on Means of Egress – Amendment 1 of 1 (2002)

Ondrus, J., Brandförlopp, LTH, Brandteknik (1990)

Quintiere, J.G., Principles of Fire Behaviour (1997)

SPC/Tech/OSD/30
Indicative Human vulerability to the hazardous agents present offshore for application in risk asseeement of major accidents. (2008)

SPFE Handbook of Fire Protection Enginnering, Second Edition (1994)

Steinberg, S. and Nielsen, G. D. A proposal for evaluating human exposure to carbon monoxide contamination in military vehicles.
Techical memorandum 11-77 US army human engineering laboratory (1977)

Stewart, R. D. The effect of carbon monoxide on man,
JFF/combustion toxicology, Vol. 1 pp. 167-176 (1974)