



# LUND UNIVERSITY

## Introduktion till konsekvensberäkningar. Några förenklade typfall

Andersson, Berit

1992

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*

Andersson, B. (1992). *Introduktion till konsekvensberäkningar. Några förenklade typfall*. (LUTVDG/TVBB--3068--SE; Vol. 3068). Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.

*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

**Lund University · Sweden**  
**Institute of Technology**  
**Department of Fire Safety Engineering**  
ISSN 1102-8246  
ISRN LUTVDG/TVBB--3068--SE

**Berit Andersson**

## **Introduktion till konsekvensberäkningar**

**Några förenklade typfall**

**Lund, september 1992**



<u>Innehållsförteckning</u>	<u>Sid</u>
1. INLEDNING	3
2. BERÄKNING AV UTSLÄPPSHASTIGHET	3
2.1 Vätskeutsläpp från en trycksatt tank	4
2.2 Utsläpp av underkyld vätska	5
2.3 Utsläpp av mättad vätska	5
2.4 Utsläpp av mättad vätska från långa rör	6
2.5 Tvåfasflöde som inte är i jämvikt	6
2.6 Utsläpp av gas	7
2.7 Flashing	8
2.8 Förångning	8
2.8.1 Kontinuerligt utsläpp av vätska med kokpunkt under omgivningens temperatur	9
2.8.2 Momentant utsläpp av vätska med kokpunkt under omgivningens temperatur	10
2.8.3 Förångning av vätska med kokpunkt över omgiv- ningens temperatur	12
3. BRAND I VÄTSKEPÖL	13
3.1 Beräkning av förbränningshastighet	14
3.2 Beräkning av pölstorlek	14
3.3 Beräkning av flamhöjd för en pölbrand	18
3.4 Strålning från pölbrand	19
3.4.1 Avgiven strålning	19
3.4.2 Strålningsandel	19
3.4.3 Av atmosfären absorberad strålning	20
3.4.4 Geometrisk synfaktor	22
3.4.5 Mottagen strålning	23
4. UPPVÄRMNING AV BEHÅLLARE	23
5. JETFLAMMOR	24
5.1 Jetflammar från LPG	24
5.2 Jetflammar från kolväten	24
6. FRIA GASMOLNSEXPLSIONER	25

7.	BLEVE OCH ELDKLOT	25
7.1	Storleken på eldklot	26
7.2	Strålning från eldklot	26
8.	SPRIDNING AV GASMOLN	27
8.1	Spridning av en lätt eller neutral gas	28
9.	EFFEKTMODELLER	32
9.1.	Giftighet	32
9.2	Termisk påverkan	33
10.	BERÄKNINGSEXEMPEL	36
10.1	Lagring av aceton utomhus	37
10.1.1	Beräkning av tankens utsläppstid och utsläpps- hastighet	39
10.1.2	Beräkning av förångningstid och förångningshastighet	40
10.1.3	Beräkning av strålning från en brand i acetonpöl	42
10.1.4	Beräkning av uppvärmning av behållare	44
10.1.5	Beräkning av storleken på ett eldklot vid aceton- utsläpp	45
10.1.6	Beräkning av strålning från eldklot	46
10.2	Lagring av gasol	47
10.2.1	Beräkning av utsläppshastighet och tömningstid	47
10.2.2	Beräkning av jetflammans storlek och av riskavstånd	48
11.	BESKRIVNING AV NÅGRA TILLGÄNGLIGA DATORPROGRAM, JÄMFÖRANDE BERÄKNINGAR	49
11.1	Kortfattad beskrivning av använda datorprogram	50
11.1.1	CHEMS-PLUS	50
11.1.2	WHAZAN	51
11.1.3	CAMEO II	54
11.1.4	HEAVY-PUFF	54
11.1.5	GREAT	54
11.1.6	SLAB	54
11.1.7	DEGADIS	55
11.2	Några resultatjämförelser från utnyttjade dator- program	55
	NOMENKLATURLISTA	60
	REFERENSER	62

## 1. INLEDNING

I dagens samhälle krävs i många fall genomförande av risk- och/eller konsekvensanalyser. Krav ställs dels från myndigheter och dels inom enskilda företag och organisationer. Här kommer endast konsekvensanalyser att behandlas. Anledningen till att genomföra en konsekvensanalys kan skifta. Som nämnts kan krav på en konsekvensanalys dels komma utifrån från myndigheter och dels kan en analys utföras för att ge ett företag underlag för åtgärdsplanering. Att göra en inventering av vilka risker som finns inom företaget och vilka konsekvenser dessa kan ge upphov till är ofta mycket lärorikt.

Syftet med här nedan redovisat arbete är att på svenska ge en sammanställning över beräkningsmetoder som kan användas vid en konsekvensanalys för att göra uppskattningar med hjälp av handräkningsmetoder. I många fall är det tillräckligt att göra denna typ av beräkningar för att få en uppfattning om storleken på konsekvenserna av ett oplanerat utsläpp. Vid omfattande analyser är det till stor hjälp att ha tillgång till något av de datorprogram för konsekvensberäkningar som finns på marknaden. Handräkningsmetoderna kan då utnyttjas som enkla kontrollinstrument av att man gett rätt indata till de beräkningsmodeller som finns i datorprogrammet. Exakt överensstämmelse får man naturligtvis inte mellan resultaten men en storleksjämförelse är ändå viktig.

Sammanställningen innehåller material från ett antal, inom området, välkända referenser. Uppläggningsen har gjorts så att i de fall materialet hämtats från originalreferensen så anges denna i annat fall hänvisas till de generella referenser som finns angivna i referenslistan. Härledningarna har genomgående utelämnats och för studier av dessa hänvisas till de generella referenserna.

Det redovisade arbetet initierades av Länsstyrelsen i Malmöhus län av det under 1989 pågående RAM-projektet (Risk-Aanalys-Malmöhus-län). Delvis har arbetet utförts inom detta projekt och även till en del finansierats av RAM-projektet.

## 2. BERÄKNING AV UTSLÄPPSHASTIGHET

Utgångspunkten för flertalet konsekvensbedömningar är någon form av oplanerat utsläpp av gas eller vätska. Utsläppet kan ske från t ex en tank eller en rörledning. Beroende på vad som lagras eller transporteras resulterar en skada i ett utsläpp av gas, vätska eller en kombination av gas och vätska. Storleken av utsläppet kan uppskattas med hjälp av enkla analytiska uttryck. Nedan redovisas ett antal sådana uttryck som gäller

för olika typer av utsläppssituationer [1, 2]. Poängteras bör att redovisningen i flertalet fall gäller beräkningar av stationära förlopp. I många verkliga processer ändras tillståndet i t ex tanken under förloppets gång. Gjorda beräkningar gäller då för inledningsfasen av utsläppet. Härav följer att beräkningarna ger en uppskattning av den största risken.

## 2.1 Vätskeutsläpp från en trycksatt tank

Ett utsläpp från en tank där vätska förvaras under tryck resulterar i ett rent vätskeutsläpp om utsläppet sker direkt från eller mycket nära tanken och om hålet i tanken är under vätskenivån.

Källstyrkan,  $\dot{Q}_1$ , kan då beräknas enligt Bernoullis ekvation

$$\dot{Q}_1 = C_d A \rho_1 (2\Delta p / \rho_1 + 2gH)^{0.5} \quad 2.1$$

$\dot{Q}_1$	= massflöde från tank [kg/s]
$C_d$	= flödeskoefficient = 0.6
$A$	= utsläppsöppningens area [m <sup>2</sup> ]
$\rho_1$	= vätskans densitet [kg/m <sup>3</sup> ]
$\Delta p$	= tryckskillnaden mellan trycket i tanken och omgivningens tryck [N/m <sup>2</sup> ]
$g$	= tyngdaccelerationen = 9.81 [m/s <sup>2</sup> ]
$H$	= vätskans höjd över utsläppspunkten [m]

I de fall då trycket i tanken är lika stort som trycket i omgivningen,  $\Delta p = 0$ , kan  $\dot{Q}_1$  beräknas som funktion av utsläppstiden enligt följande

$$\dot{Q}_1(t) = [0.6 A \rho_1 (2g H_0)^{0.5} - t(0.6 A)^2 \rho_1 g/a] \quad 2.2$$

$\dot{Q}_1(t)$	= massflöde från tank som funktion av tiden [kg/s]
$A$	= utsläppsöppningens area [m <sup>2</sup> ]
$\rho_1$	= vätskans densitet [kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	= tyngdaccelerationen = 9.81 [m/s <sup>2</sup> ]
$H_0$	= ursprunglig vätskehöjd (vid $t = 0$ ) [m]
$t$	= tid [s]
$a$	= tankens tvärsnittsytta [m <sup>2</sup> ]

Totala utsläppstiden kan då beräknas enligt

$$t = (1.67 a/A)(2 H_0/g)^{0.5} \quad 2.3$$

För beteckningar se ovan.

## 2.2 Utsläpp av underkyld vätska

För en vätska som förvaras under tryck, trycksatt med hjälp av en inert gas (vanligen  $N_2$ ), så att ångtrycket är högre än atmosfärstryck och lagringstemperaturen är under den mättnadstemperatur som gäller för rådande lagringstryck beräknas utsläppshastigheten enligt ekvation (2.4):

$$\dot{Q}_l = C_d A \rho_l \left\{ [2 (p_s - p_{vp})/\rho_l] + 2 g H \right\}^{1/2} \quad 2.4$$

$\dot{Q}_l$	= massflöde från tank [kg/s]
$C_d$	= flödeskoefficient = 0.6
$A$	= utsläppsöppningens area [m <sup>2</sup> ]
$\rho_l$	= vätskans densitet [kg/m <sup>3</sup> ]
$p_s$	= lagringstryck [N/m <sup>2</sup> ]
$p_{vp}$	= åntrycket för vätskan vid lagringstemperaturen [N/m <sup>2</sup> ]
$g$	= tyngdaccelerationen = 9.81 [m/s <sup>2</sup> ]
$H$	= vätskans höjd över utsläppspunkten [m]

## 2.3 Utsläpp av mättad vätska, tvåfasutsläpp

När vätskan är mättad med ånga ( $p_s = p_{vp}$ ) och jämvikt råder erhålles ett tvåfas flöde enligt nedan

$$\dot{Q}_t = [A \Lambda / (\rho_g^{-1} - \rho_l^{-1})] (T_s C_{pl})^{-1/2} \quad 2.5$$

$\dot{Q}_t$	= total utsläppshastighet, gas och vätska [kg/s]
$A$	= utsläppsöppningens area [m <sup>2</sup> ]
$\Lambda$	= latent förångningsvärme [J/kg]
$\rho_g$	= gasens densitet vid lagringstryck [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_l$	= vätskans densitet [kg/m <sup>3</sup> ]
$T_s$	= lagringstemperatur [K]
$C_{pl}$	= specifikt värme, vid konstant tryck, för vätskan [J/kg K]



För att ekvation ska gälla måste följande villkor uppfyllas:

$$x < p_s (\rho_g^{-1} - \rho_l^{-1}) (T_s C_{pl}) / \Lambda^2$$

Där  $x$  är viktsandelen ånga efter trycksänkning till atmosfärstryck. Vidare måste utsläppet ske minst 0.1 m från tanken dvs rörlängden  $> 0.1$  m.

#### 2.4 Utsläpp av mättad vätska från långa rör, tvåfasutsläpp

Om utsläpp av den typ som beskrivs under 2.3 sker från ett långt rör måste hänsyn tas till friktionsförluster. Uttrycket 2.5 måste då multipliceras med en faktor  $F$ . Förslag på reduceringsfaktorer ges i tabell 2.1 där  $L_p$  är rörlängd och  $D$  är rörets diameter i m.

Tabell 2.1

Variation av förlustfaktorn  $F$  med förhållande  $L_p/D$

$L_p/D$	$F$
0	1
50	0.85
100	0.75
200	0.65
400	0.55

#### 2.5 Tvåfasflöde som inte är i jämvikt

För rörlängder mindre än 0.1 m hinner inte ett stabilt tvåfasflöde bildas. Ekvation 2.5 modifieras genom multiplikation med faktorn  $N^{-0.5}$ .  $N$  ges av uttrycket nedan

$$N = \Lambda^2 / [2 (\Delta p) \rho_l C_d^2 (\rho_g^{-1} - \rho_l^{-1})^2 T_s C_{pl}] + L_p/L_e \quad 2.6$$

$\Lambda$  = latent förångningsvärme [J/kg]

$\Delta p$  = tryckskillnaden mellan trycket i tanken och omgivningens tryck [N/m<sup>2</sup>]

$\rho_l$  = vätskans densitet [kg/m<sup>3</sup>]

$C_d$  = flödeskoefficient = 0.6

$\rho_g$	= gasens densitet vid lagringstryck [kg/m <sup>3</sup> ]
$T_s$	= lagringstemperatur [K]
$C_{pl}$	= specifikt värme, vid konstant tryck, för vätskan [J/kg K]
$L_p$	= rörets längd till öppningen [m]
$L_e$	= 0.1 [m]

## 2.6 Utsläpp av gas

Om den studerade föreningen lagras som gas erhålles ett rent gasutsläpp. Följande gäller då för beräkning av utsläppshastighet. Beräkna först uttrycket

$$r_{\text{crit}} = \left[ \frac{p_s}{p_a} \right]_{\text{crit}} = [(\gamma + 1)/2]^{\gamma/(\gamma-1)}$$

$$\gamma = C_p/C_v$$

$r_{\text{crit}}$  anger övergång till kritiskt flöde

$$\text{För } \frac{p_s}{p_a} < r_{\text{crit}}$$

beräknas  $\dot{Q}_g$  enligt 2.7

$$\dot{Q}_g = C_d A \left\{ 2 \rho_g p_s [\gamma/(\gamma-1)] [(p_a/p_s)^{2/\gamma} - (p_a/p_s)^{(\gamma+1)/\gamma}] \right\}^{0.5} \quad 2.7$$

för  $\frac{p_s}{p_a} \geq r_{\text{crit}}$  gäller

$$\dot{Q}_g = C_d A p_s \left\{ (\gamma M/R^* T_s) [2/(\gamma+1)]^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \right\}^{0.5} \quad 2.8$$

$p_s$	= lagringstryck [N/m <sup>2</sup> ]
$p_a$	= lufttrycket i omgivningen [N/m <sup>2</sup> ]
$C_p$	= specifikt värme vid konstant tryck [J/kg K]
$C_v$	= specifikt värme vid konstant volym [J/kg K]
$\dot{Q}_g$	= utflödes hastighet för gas [kg/s]
$C_d$	= flödeskoefficient = 0.8
$A$	= öppningens area [m <sup>2</sup> ]

$\rho_g$	= gasens densitet vid lagringstryck [kg/m <sup>3</sup> ]
$M$	= gasens molekylvikt [kmol]
$R^*$	= gaskonstant = 8310 [J/kmol K]
$T_s$	= lagringstemperatur [K]

## 2.7 Flashing

Vid utsläpp av en överhettad vätska,  $T_s > T_b$ , förångas en del av vätskan snabbt då trycket reduceras till atmosfärstryck. Detta förlopp brukar benämnas flashing. Den andel av utsläppet,  $f$ , som på detta sätt direkt övergår till gasfas kan beräknas enligt

$$f = C_{pl} \Delta T / \Lambda \quad 2.9$$

$$\Delta T = (T_s - T_b)$$

$C_{pl}$	= specifikt värme, vid konstant tryck, för vätskan [J/kg K]
$\Lambda$	= latent förångningsvärme [J/kg]
$T_s$	= lagringstemperatur [K]
$T_b$	= kokpunkt vid atmosfärstryck [K]

Den bildade gasen kan rycka med sig vätska i form av droppar av vilka en del kan bli kvar i gasen i form av aerosol och senare förångas. Andelen aerosol i utsläppet kan variera inom vida gränser. En uppskattning kan vara att sätta andelen av utsläppet, som direkt bildar ett gasmoln, till  $2f$  [3]. Resten av utsläppet bildar en vätskepöl på marken.

## 2.8 Förångning

Vid vätskeformiga utsläpp bildas i vissa fall en pöl på underlaget. Småningom förångas vätskan och bildar ett gasmoln. Förångningshastigheten påverkas bl a av underlagets beskaffenhet och vätskans kemiska egenskaper. För vätskor med en kokpunkt under omgivningens temperatur gäller att under ett inledningsskede tas värme till förångningen från underlaget. När underlaget kylts ner måste värme till förångningen tas från den omgivande luften.

Nedan ges en beräkningsmetod som ger maximal förångningshastighet för vätskor med kokpunkt under omgivningens temperatur [4]. Två fall måste särskiljas dels kontinuerligt utsläpp och dels momentant utsläpp.

2.8.1 Kontinuerligt utsläpp av vätska med kokpunkt under omgivningens temperatur

– Beräkna den andel som flashar direkt vid utsläppet, enligt ekvation 2.9.

$$f = C_{pl} \Delta T / \Lambda \quad 2.9$$

$$\Delta T = T_s - T_b$$

$C_{pl}$  = specifikt värme, vid konstant tryck, för vätskan [J/kg K]

$\Lambda$  = latent förångningsvärme [J/kg]

$T_s$  = lagringstemperatur [K]

$T_b$  = vätskans kokpunkt vid atmosfärstryck [K]

– Beräkna tillförseln av vätska till pölen

$$\dot{V} = Q_1 (1 - f) / \rho_1 \quad 2.10$$

$\dot{V}$  = tillföde av vätska [m<sup>3</sup>/s]

$Q_1$  = utflödes hastigheten beräknad enligt något av uttrycken i tidigare avsnitt [kg/s]

$\rho_1$  = vätskans densitet [kg/m<sup>3</sup>]

$f$  = andel flashande vätska

– Beräkna pölens maximala radie

$$r = 0.2804 \cdot \rho_1^{0.75} \cdot \dot{V}^{0.625} / [g^{0.125} \cdot s^{0.75}] \quad 2.11$$

$r$  = pölens radie [m]

$\rho_1$  = vätskans densitet [kg/m<sup>3</sup>]

$\dot{V}$  = tillflöde av vätska [m<sup>3</sup>/s]

$g$  = tyngdaccelerationen = 9.81 [m/s<sup>2</sup>]

$$s = \frac{\Delta T}{\Lambda} [2 \cdot 10^6 / \pi]^{0.5} [\text{kg/m}^2 \text{s}^{1/2}] \quad 2.12$$

$$\Delta T = T_m - T_b$$

$T_m$  = markens ursprungstemperatur [K]

$T_b$  = vätskans kokpunkt vid atmosfärstryck [K]

$\Lambda$  = latent förångningsvärme [J/kg]

– Beräkna förångningshastigheten

$$\dot{m} = s \cdot c \cdot \frac{\pi}{2.0} \cdot t_d \quad [\text{kg/s}] \quad 2.13$$

s = parameter beräknad enligt 2.12

$$c = 0.75 (2.0 \cdot \pi \cdot g \cdot \dot{V})^{0.5} \quad [\text{m}^2/\text{s}^{3/2}] \quad 2.14$$

g = tyngdaccelerationen = 9.81 [m/s<sup>2</sup>]

$\dot{V}$  = tillförsel av vätska [m<sup>3</sup>/s]

$$t_d = r^{1.33} [(2 \cdot \pi)/(9.81 \cdot \dot{V})]^{0.33} \quad [\text{s}] \quad 2.15$$

r = pölens radie beräknad enligt 2.11

V = tillförsel av vätska [m<sup>3</sup>/s]

I vissa fall finns yttre begränsningar för pölens storlek. En jämförelse måste då göras mellan beräknad radie, r och radien för den tillgängliga ytan. Det minsta värdet utnyttjas i beräkningarna.

Vid genomförda försök med kontinuerliga utsläpp av kondenserad gas har man funnit att det inte bildas någon pöl utan att hela utsläppet går direkt upp i gasmolnet. Förutsättningen för att en pöl ska bildas är att den utströmmande gas-vätskeblandningen träffar en yta så att en "återkondensering" kan ske.

### 2.8.2 Momentant utsläpp av vätska med kokpunkt under omgivningens temperatur

För ett momentant utsläpp får beräkningsgången modifieras något och presenteras därför i sin helhet nedan.

– Beräkna den andel som flashar direkt vid utsläppet, enligt ekvation 2.9

$$f = C_{pl} \Delta T / \Lambda$$

$$\Delta T = T_s - T_b$$

- $C_{pl}$  = specifikt värme, vid konstant tryck, för vätskan [J/kg K]  
 $\Lambda$  = latent förångningsvärme [J/kg]  
 $T_s$  = lagringstemperatur [K]  
 $T_b$  = vätskans kokpunkt vid atmosfärstryck [K]

– Beräkna mängden vätska i pölen

$$V = m(1 - f)/\rho_1 \quad 2.16$$

- $V$  = till pölen tillförd volym vätska [m<sup>3</sup>]  
 $m$  = utsläppt massa [kg]  
 $f$  = andel flashande vätska  
 $\rho_1$  = vätskans densitet [kg/m<sup>3</sup>]

– Beräkna pölens radie

$$r = (g \cdot V)^{0.25} \cdot t_d^{0.5} \quad [\text{m}] \quad 2.17$$

- $g$  = tyngdaccelerationen = 9.81 [m/s<sup>2</sup>]  
 $V$  = till pölen tillförd volym vätska [m<sup>3</sup>]

$$t_d = \rho_1^{0.67} \cdot V^{0.33} \cdot 0.6109 / (g^{0.67} \cdot s^{0.33}) \quad [\text{s}] \quad 2.18$$

- $\rho_1$  = vätskans densitet [kg/m<sup>3</sup>]  
 $V$  = till pölen tillförd volym [m<sup>3</sup>]  
 $g$  = tyngdaccelerationen = 9.81 [m/s<sup>2</sup>]

$$s = \frac{\Delta T}{\Lambda} (2 \cdot 10^6 / \pi)^{0.5} \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}] \quad 2.19$$

$$\Delta T = T_m - T_b$$

- $T_m$  = markens ursprungstemperatur [K]  
 $T_b$  = vätskans kokpunkt vid atmosfärstryck [K]  
 $\Lambda$  = latent förångningsvärme [J/kg]

– Beräkna förångningshastigheten

$$\dot{m} = s \cdot \pi (g \cdot V \cdot t_d)^{0.5} \quad [\text{kg/s}] \quad 2.20$$

s	= beräknas enligt 2.19
g	= tyngdaccelerationen = 9.81 [m/s <sup>2</sup> ]
V	= till pölen tillförd volym vätska [m <sup>3</sup> ]
t <sub>d</sub>	= beräknas enligt 2.18

I de fall då yttre begränsningar finns för pölens storlek måste en jämförelse göras mellan beräknad radie r och radien för den tillgängliga ytan. Det minsta värdet av dessa utnyttjas i beräkningarna.

### 2.8.3 Förångning av vätska med kokpunkt över omgivningens temperatur

Följande uppsättning ekvationer kan utnyttjas för att beräkna förångningshastigheten från en pöl då vätskans kokpunkt är högre än omgivningens temperatur. Den här angivna metoden bygger på utnyttjandet av det dimensionslösa masstransporttalet B och metoden utnyttjas vid förbränningsberäkningar [5]. Traditionellt används alternativa beräkningsmetoder inom andra ingenjörsciensdiscipliner. För dessa refereras t ex till [6]. Jämförande beräkningar visar att resultaten från de olika metoderna överensstämmer väl.

$$Y_{FW} = 1/[1 + [(p/p_F)-1] \cdot (M_{luft}/M_F)] \quad 2.21$$

$$B = (Y_{F_\infty} - Y_{FW})/(Y_{FW} - Y_{FR}) \quad 2.22$$

$$Re = u \cdot D/\nu \quad 2.23$$

$$Nu = 0.037 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr_{luft}^{1/3} \quad 2.24$$

$$h = Nu \cdot k_{luft}/D \quad 2.25$$

$$\dot{m}_s'' = (h/C_{p_{luft}}) \cdot \ln(1 + B) \quad 2.26$$

Y <sub>FW</sub>	= massfraktion bränsle vid ytan i gasfas
Y <sub>F<sub>∞</sub></sub>	= massfraktion bränsle i luften ovanför bränsleytan
Y <sub>FR</sub>	= massfraktion bränsle i vätskepölen
p	= lufttryck = 760 mm Hg
p <sub>F</sub>	= ångtryck för bränsle [mm Hg]
M <sub>luft</sub>	= molekylvikt för luft = 28.85 g/mol
M <sub>F</sub>	= molekylvikt för bränslet [g/mol]

B	= dimensionslöst masstransporttal
Re	= Reynolds tal, dimensionslöst
Nu	= Nusselts tal, dimensionslöst
$Pr_{\text{luft}}$	= Prandtls tal för luft, dimensionslöst = 0.71
u	= vindhastighet [m/s]
D	= pölens diameter [m]
$\nu$	= kinematisk viskositet för luft = $15.08 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
h	= konvektivt värmeövergångstal [W/m <sup>2</sup> K]
$k_{\text{luft}}$	= konduktivitet för luft = 0.02568 W/mK
$\dot{m}''_s$	= massflöde från ytan [g/m <sup>2</sup> s]
$C_{P_{\text{luft}}}$	= värmekapacitet för luft = 1 J/gK

Vid beräkning av Re utnyttjas pölens diameter D. Om pölen inte är cirkulär får pölens area räknas om till cirkulär och diametern bestämmas därifrån.

Efter att  $\dot{m}''_s$  beräknats kan den totala förångningshastigheten  $\dot{m}_s$  tas fram.

$$\dot{m}_s = \dot{m}''_s \cdot A_p \quad 2.27$$

$$A_p = \text{pölens area [m}^2\text{]}$$

Genom att uppskatta den totala massan i pölen kan man beräkna hur lång tid det skulle ta för hela pölen att förångas.

$$t = m/\dot{m}_s$$

$$t = \text{total förångningstid [s]}$$

$$m = \text{total massa i pölen [kg]}$$

För beräkningsgång enligt denna metod hänvisas till avsnitt 10.1.2.

### 3. BRAND I VÄTSKEPÖL

Vid ett utsläpp av brännbar vätska finns alltid risk för antändning av den bildade vätskepölen. För att beräkna strålningen från en pölbrand behövs ett antal beräknings-



steg. Dessa omfattar beräkning av förbränningshastighet, pölstorlek, flamhöjd, från flammen avgiven värme, synfaktorer och storleken av den värme som når fram till det studerade objektet.

### 3.1 Beräkning av förbränningshastighet

Många studier har gjorts av brand i en vätskepöl. Pölens storlek har betydelse för förbränningshastigheten. De uttryck som ges nedan gäller för pölar med en diameter  $D > 0.2 \text{ m}$  [7].

Denna metod ger massförlusten vid brand i en vätskepöl

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-k\beta D}) \quad 3.1$$

$\dot{m}''_{\infty}$  = massförlusten vid brand i en pöl med oändligt stor diameter [ $\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}$ ]

$k\beta$  = materialkonstanter som ger flammans förmåga att absorbera strålning [ $\text{m}^{-1}$ ]

$D$  = pölens diameter [ $\text{m}$ ]

I de fall då pölen inte är cirkulär måste ur pölens area framräknas vilken ekvivalent diameter denna area motsvarar. I tabell 3.1 ges värden på  $\dot{m}''_{\infty}$  och  $k\beta$  för ett antal organiska föreningar som kan ge upphov till en brinnande pöl.

För de vanligast förekommande kolvätena finns värden på förbränningshastighet tillgängliga i litteraturen. I tabell 3.2 ges förbränningshastigheten för kolväten samt en rad andra data för dessa föreningar. Förbränningshastigheten ges i  $\text{m}/\text{s}$  men kan lätt omvandlas till  $\text{kg}/\text{s}$  genom multiplikation med vätskans densitet som också ges i tabell 3.2. Det ska nämnas att givna data gäller pölbränder på mark. Om vätskan har vatten som underlag kan resultatet bli ett helt annat.

### 3.2 Beräkning av pölstorlek

Av stor betydelse för pölbrandens storlek och intensitet är pölens storlek. Vid ett kontinuerligt utsläpp av en brännbar vätska till en brinnande pöl kan pölens diameter beräknas enligt nedan [8].

Tabell 3.1 Ingångsdata för beräkning av organiska föreningars förbränningshastighet [7]

Namn	Densitet	Effektivt förbränningsvärme	Förbränningshastighet stor diameter	
	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\Delta h_c$ [MJ/kg]	$\dot{m}''_{\infty}$ [kg/m <sup>2</sup> s]	$k\beta$ [m <sup>-2</sup> ]
<b>Kondenserade gaser</b>				
hydrogen (H <sub>2</sub> (l))	70	120.0	0.017	6.1
LNG ( $\approx$ CH <sub>4</sub> )	415	50.0	0.078	1.1
LPG ( $\approx$ C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	585	46.0	0.099	1.4
<b>Alkoholor</b>				
metanol (CH <sub>3</sub> OH)	796	20.0	0.017	—
etanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	794	26.8	0.015	—
<b>Enkla organiska bränslen</b>				
butan (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	573	45.7	0.078	2.7
bensen (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	874	40.1	0.085	2.7
hexan (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	650	44.7	0.074	1.9
heptan (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> )	675	44.6	0.101	1.1
xylen (C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> )	870	40.8	0.090	1.4
aceton (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O)	791	25.8	0.041	1.9
dioxan (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> )	1035	26.2	0.018	5.4
dietyleter (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O)	714	24.2	0.085	0.7
<b>Petroleum produkter</b>				
bensin	740	44.7	0.048	3.6
motorbensin	740	43.7	0.055	2.1
fotogen	820	43.2	0.039	3.5
JP-4 (flygbränsle)	760	43.5	0.051	3.6
JP-5 (flygbränsle)	810	43.0	0.054	1.6
transformatorolja	760	46.4	0.039	0.7
eldningsolja (tung)	940–1000	39.7	0.035	1.7
råolja	830–880	42.5– 42.7	0.022– 0.045	2.8
<b>Fasta ämnen</b>				
polymetylmetakrylat (C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>n</sub>	1184	24.9	0.020	3.3
polypropen (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> ) <sub>n</sub>	905	43.2	0.018	
polystyren (C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> ) <sub>n</sub>	1050	39.7	0.034	

Tabell 3.2

Fysikaliska egenskaper och förbränningshastigheter för pölbränder med kolväteföreningar

Namn	Effektivt förbrännings- värme [J/kg]	Förångnings- värme [J/kg]	Kokpunkt vid 1 atm [K]	Specifikt värme för vätska [J/kg K]	Densitet för vätska [kg/m <sup>3</sup> ]	Förbrännings- hastighet [m/s]
Metan	500 · 10 <sup>5</sup>	5.1 · 10 <sup>5</sup>	111.7	4000	422	2.08 · 10 <sup>-4</sup>
Etan	475 · 10 <sup>5</sup>	4.9 · 10 <sup>5</sup>	184.4	2750	546	1.22 · 10 <sup>-4</sup>
Propan	460 · 10 <sup>5</sup>	4.3 · 10 <sup>5</sup>	231.1	2400	590	1.37 · 10 <sup>-4</sup>
Butan	454 · 10 <sup>5</sup>	3.9 · 10 <sup>5</sup>	272.7	2297	600	1.32 · 10 <sup>-4</sup>
Pentan	450 · 10 <sup>5</sup>	3.6 · 10 <sup>5</sup>	309.7	2207	626	1.43 · 10 <sup>-4</sup>
Hexan	448 · 10 <sup>5</sup>	3.4 · 10 <sup>5</sup>	341.9	2456	659	1.22 · 10 <sup>-4</sup>
Heptan	446 · 10 <sup>5</sup>	3.2 · 10 <sup>5</sup>	371.9	2606	684	1.13 · 10 <sup>-4</sup>
Oktan (n-)	444 · 10 <sup>5</sup>	3.0 · 10 <sup>5</sup>	398.9	2113	702	1.05 · 10 <sup>-4</sup>
Nonan (n-)	443 · 10 <sup>5</sup>	3.0 · 10 <sup>5</sup>	424.0	2105	719	9.67 · 10 <sup>-5</sup>
Isobutan	453 · 10 <sup>5</sup>	3.7 · 10 <sup>5</sup>	261.4	2297	595	1.55 · 10 <sup>-4</sup>
Isohexan	445 · 10 <sup>5</sup>	3.2 · 10 <sup>5</sup>	333.5	2243	653	1.37 · 10 <sup>-4</sup>
Isopentan	449 · 10 <sup>5</sup>	3.4 · 10 <sup>5</sup>	301.1	2205	621	1.23 · 10 <sup>-4</sup>
Eten	472 · 10 <sup>5</sup>	4.8 · 10 <sup>5</sup>	169.5	2750	569	1.23 · 10 <sup>-4</sup>
Propen	458 · 10 <sup>5</sup>	3.4 · 10 <sup>5</sup>	225.5	2500	520	1.33 · 10 <sup>-4</sup>
Buten	453 · 10 <sup>5</sup>	3.9 · 10 <sup>5</sup>	266.9	2177	595	1.47 · 10 <sup>-4</sup>
Cyklohexan	435 · 10 <sup>5</sup>	3.6 · 10 <sup>5</sup>	353.9	1810	776	1.15 · 10 <sup>-4</sup>
Cyklopentan	465 · 10 <sup>5</sup>	3.9 · 10 <sup>5</sup>	322.5	1754	755	1.32 · 10 <sup>-4</sup>
Metylcyklopentan	440 · 10 <sup>5</sup>	3.8 · 10 <sup>5</sup>	345.0	1889	749	1.18 · 10 <sup>-4</sup>
Bensen	406 · 10 <sup>5</sup>	3.9 · 10 <sup>5</sup>	353.3	1753	878	1.00 · 10 <sup>-4</sup>
Toluen	406 · 10 <sup>5</sup>	3.6 · 10 <sup>5</sup>	383.8	1841	869	9.50 · 10 <sup>-5</sup>
Xylen	408 · 10 <sup>5</sup>	3.5 · 10 <sup>5</sup>	417.6	1674	864	9.67 · 10 <sup>-5</sup>
Etylbensen	414 · 10 <sup>5</sup>	3.4 · 10 <sup>5</sup>	409.4	1695	870	9.67 · 10 <sup>-5</sup>

$$D_{\text{eq}} = 2 [\dot{V}/\pi \dot{y}]^{1/2} \quad 3.2$$

- $D_{\text{eq}}$  = pölens diameter vid jämvikt [m]  
 $\dot{V}$  = utsläppshastighet för vätskan [m<sup>3</sup>/s]  
 $\dot{y}$  = vätskans förbränningshastighet [m/s]

Denna diameter erhålles så länge utsläppet pågår därefter minskar diametern. Den tid det tar för pölen att nå diametern  $D_{\text{eq}}$  ges av

$$t_{\text{eq}} = 0.564 \frac{D_{\text{eq}}}{(g' \dot{y} D_{\text{eq}})^{1/3}} \quad 3.3$$

- $D_{\text{eq}}$  = pölens diameter vid jämvikt [m] ges av 3.2  
 $g'$  =  $g[1 - (\rho_1/\rho_w)]$   
 $g$  = tyngdaccelerationen = 9.81 [m/s<sup>2</sup>]  
 $\rho_1$  = vätskans densitet [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_w$  = densitet för vatten [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\dot{y}$  = vätskans förbränningshastighet [m/s]

För ett momentant utsläpp kan den maximala diametern för en brinnande pöl beräknas enligt

$$D_{\text{max}} = 2[V^3 g'/\dot{y}^2]^{1/8} \quad 3.4$$

- $V$  = totalt utsläppt volym vätska [m<sup>3</sup>]  
 $g'$  = beräknas enligt ovan  
 $\dot{y}$  = vätskans förbränningshastighet [m/s]

Tiden för att uppnå  $D_{\text{max}}$  ges av

$$t_{\text{max}} = 0.6743 [V/g' \dot{y}^2]^{1/4} \quad 3.5$$

- $V$  = totalt utsläppt volym vätska [m<sup>3</sup>]  
 $g'$  = beräknas enligt ovan  
 $\dot{y}$  = vätskans förbränningshastighet [m/s]

För att få pölens diameter vid en viss tidpunkt  $t \leq t_{\max}$  kan följande uttryck användas.

$$\left(\frac{D}{D_{\max}}\right)^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(\frac{t}{t_{\max}}\right) \left[1 + \left(\frac{2}{\sqrt{3}} - 1\right) \left(\frac{t}{t_{\max}}\right)^2\right] \quad 3.6$$

$D_{\max}$  är ett största värde. Vid beräkningar bör ett mindre värde väljas så att inte riskerna överskattas.

### 3.3 Beräkning av flamhöjd för en pölbrand

Flamhöjden vid en pölbrand kan beräknas med hjälp av empiriskt framtagna data. I de fall då man kan bortse från inverkan av vind kan följande uttryck användas för en cirkulär pöl [9]

$$H_f/D = 42 [\dot{m}''/\rho_a \sqrt{gD}]^{0.61} \quad 3.7$$

$H_f$  = flammans höjd [m]

$D$  = pölens diameter [m]

$\dot{m}''$  = förbränningshastighet per ytenhet [kg/s·m<sup>2</sup>]

$\rho_a$  = densitet för omgivande luft [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  = tyngdaccelerationen = 9.81 m/s<sup>2</sup>

Under påverkan av vind ser uttrycket något annorlunda ut [9]

$$H_f/D = 55 [\dot{m}''/\rho_a \sqrt{gD}]^{0.67} u^{*-0.21} \quad 3.8$$

$H_f$  = flammans höjd [m]

$D$  = pölens diameter [m]

$\dot{m}''$  = förbränningshastighet per ytenhet [kg/s·m<sup>2</sup>]

$\rho_a$  = densitet för omgivande luft [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  = tyngdaccelerationen = 9.81 m/s<sup>2</sup>

$$u^* = u / \left[ \frac{g \dot{m}'' D}{\rho_v} \right]^{1/3} \quad 3.9$$

- $u^*$  = dimensionslös vindhastighet  
 $u$  = vindhastighet [m/s]  
 $\rho_v$  = vätskans ångdensitet [kg/m<sup>3</sup>]

Ovanstående uttryck kan även användas för andra pölbränder än cirkulära, dock bör längd-breddförhållandet vara  $< 5$ .

### 3.4 Strålning från pölbrand

Nedan ges en förenklad metod att beräkna avgiven strålning från en pölbrand och den strålning som når ett föremål på ett givet avstånd från branden.

#### 3.4.1 Avgiven strålning

Beräkna den från branden totalt avgivna effekten  $\dot{q}$  [MW].

$$\dot{q} = \dot{m}'' \cdot \Delta h_c \cdot A_p \quad 3.10$$

- $\dot{q}$  = från branden totalt avgiven effekt [MW]  
 $\dot{m}''$  = förbränningshastighet per ytenhet [kg/s · m<sup>2</sup>]  
 $\Delta h_c$  = effektivt förbränningsvärme [MJ/kg]  
 $A_p$  = pölens area [m<sup>2</sup>]

Förbränningshastigheten  $\dot{m}''$  kan beräknas enligt ekvation 3.1 eller tas från tabell 3.2.

#### 3.4.2 Strålningsandel

$\dot{q}$  anger den totalt avgivna effekten.

Strålningen utgör en andel av denna effekt. I litteraturen anges siffror för strålningsandelen i storleksordningen [10]

$$X_E = 0.15 - 0.35$$

$$\dot{q}_T = X_E \cdot \dot{q} \quad 3.11$$

- $\dot{q}_T$  = emitterad effekt [kW]

I tabell 3.3 anges uppmätta värden på avgiven strålning från brand i några olika brännbara vätskor samt värden på  $X_E$  för dessa vätskor.

För de fall då det inte går att finna något  $X_E$  för den vätska som beräkningen gäller väljes lämpligen  $X_E = 0.3$ .

### 3.4.3 Av atmosfären absorberad strålning

Strålning från en flamma absorberas och sprids på sin väg genom luften. Detta ger en avsevärd minskning av den strålning som når föremål på stora avstånd från branden.

För ett avstånd på 100 m kan reduktionen bli så stor som 20–40%. Genom att känna luftens fuktighet kan en korrektionsfaktor  $\tau$  beräknas.

$$\tau = 2.02 (p_w X)^{-0.09} \quad 3.12$$

$p_w$  = ångtryck för vatten [Pa]

$X$  = avstånd från flamytan till mottagande föremål [m]

I tabell 3.4 ges ångtrycket för vatten vid temperaturer mellan 0°C och 30°C. Detta ångtryck gäller för 100% relativ luftfuktighet. I ett verkligt fall måste  $P_w$  multipliceras med gällande relativ luftfuktighet.

Tabell 3.3 Experimentellt uppmätta värden på avgiven strålning från brand i vätskepölar [10]

Material	Pöldiameter [m]	Avgiven strålning [kW/m <sup>2</sup> ]	Strålnings- andel $X_E$
Metanol	0.076	12.5	0.162
	0.152	9.1	0.165
	1.22	8.4	0.170
Metan	0.305	67	0.21
	0.76	64	0.23

Tabell 3.3 Forts.

Material	Pöldiameter [m]	Avgiven strålning [kW/m <sup>2</sup> ]	Strålnings- andel X <sub>E</sub>
LNG	1.53	46–73	0.15–0.24
	3.05	88–125	0.24–0.34
	6.10	89–121	0.20–0.27
Butan	0.305	66	0.199
	0.457	61	0.205
	0.76	75	0.269
Motorbensin	1.22	68–91	0.30–0.40
	1.53	37–63	0.16–0.27
	3.05	35–38	0.13–0.14
Bensen	0.076	184	0.35
	0.457	79	0.345
	0.76	75	0.35
	1.22	79	0.36

Tabell 3.4 Mättnadsångtryck för vatten [10]

Temperatur [°C]	Ångtryck [Pa]
0	600
2	700
4	800
6	920
8	1060
10	1210
11	1300
12	1380
14	1580
15	1680
16	1790
17	1920



Tabell 3.4 Forts.

Temperatur [°C]	Ångtryck [Pa]
18	2040
19	2170
20	2310
21	2450
22	2610
23	2770
24	2940
25	3130
26	3320
27	3520
28	3730
29	3950
30	4190

#### 3.4.4 Geometrisk synfaktor

För att beräkna hur stor strålning som når ett föremål på ett bestämt avstånd från pölbranden behövs ett värde på den geometriska synfaktorn. Storleken på denna beror på flammans form och det mottagande föremålets orientering. Den enklaste synfaktorn ges för en punktkälla. I detta fall antages att all strålning kommer från en enda punkt och att det mottagande föremålet är orienterat vinkelrätt mot denna. För strålning från en punktkälla fås synfaktorn enligt ekvation 3.13

$$F_p = \frac{1}{4\pi X^2} \quad 3.13$$

$F_p$  = synfaktor för en punktkälla [ $m^{-2}$ ]

$X$  = avstånd mellan punktkälla och mottagande föremål [m]

Observera att  $F_p$  har dimensionen  $m^{-2}$  och att den därför måste användas tillsammans med totalt avgiven strålning och inte strålning per ytenhet. Slutmålet är att bestämma mottagen strålning per ytenhet. För noggrannare beräkningar av  $F_p$  där hänsyn tas till geometri hos flammen och orientering hos mottagande föremål hänvisas till läroböcker i värmeöverföring.

### 3.4.5 Mottagen strålning

Genom att utnyttja de i avsnitten 3.4.2 till 3.4.4 beräknade faktorerna kan den mottagna strålningen för ett föremål på ett bestämt avstånd från pölbranden beräknas.

$$\dot{q}_x'' = \tau \cdot \dot{q}_r \cdot F_p \quad 3.14$$

$\dot{q}_x''$  = termisk strålning mottagen på avståndet X från källa [kW/m<sup>2</sup>]

$\dot{q}_r$  = emitterad effekt [kW]

$\tau$  = av atmosfären absorberad strålning enligt ekv. 3.12

$F_p$  = synfaktor för en punktkälla [m<sup>-2</sup>] enligt ekv 3.13

## 4. UPPVÄRMNING AV BEHÅLLARE

En behållare som utsätts för brand utifrån utsätts för stora påfrestningar. Temperaturen inne i tanken ökar och därmed även trycket. Vid ett visst övertryck kan tanken inte stå emot längre utan brister. Nedan ges en metod att beräkna hur fort vätskan i en tank värms upp [11]. Denna metod bygger på principen om koncentrerad massa och kan endast utnyttjas då en tank är helt omgiven av brand. En tank som är avsedd för lagring av en vätska vid atmosfärstryck är ofta dimensionerad så att den tål ett övertryck på 1 atm. Vid större övertryck rämnar tanken.

$$(T(t) - T_g)/(T_o - T_g) = e^{-t/\tau(\text{tank})} \quad 4.1$$

$$\tau(\text{tank}) = C_{pl} \cdot \rho_l \cdot V/(h_{\text{luft}} \cdot A_t) \quad 4.2$$

$T(t)$  = temperatur i tanken vid tiden t [K]

$T_g$  = gastemperatur i flamman [K]

$T_o$  = vätskans begynnelsestemperatur [K]

$t$  = tid [s]

$\tau(\text{tank})$  = tidskonstant [s]

$C_{pl}$  = specifikt värme för vätskan, vid konstant tryck [J/kg K]

$\rho_l$  = vätskans densitet [kg/m<sup>3</sup>]

$V$  = vätskans volym [m<sup>3</sup>]

$h_{\text{luft}}$  = värmeövergångstal för luft [W/m<sup>2</sup> K]

$A_t$  = area som är utsatt för strålning (behållarens mantelyta) [m<sup>2</sup>]

Enligt [12] säger erfarenheten att rörledningar till tankar som är utsatta för brand går sönder efter 10–15 minuter. Detta kan användas som jämförelse vid beräkningar för brandutsatta lagertankar (ej tryckkärl).

## 5. JETFLAMMOR

Teorin runt jetflammar är inte så väl känd och lika genomarbetad som när det gäller pölbränder. Om syftet är att kunna beräkna riskavstånd runt en jetflamma kan det vara tillräckligt att utnyttja någon av de empiriska överslagsformler som presenterats i litteraturen. Två exempel på sådana uttryck ges nedan.

### 5.1 Jetflammar från LPG

För LPG ges följande samband

$$L = 9.1 Q_t^{0.5} \quad 5.1$$

$$W = 0.25 L \quad 5.2$$

$$r_{s,50} = 1.9 t^{0.4} Q_t^{0.47} \quad 5.3$$

L = jetflammans längd [m]

W = jetflammans halva bredd vid flamspetsen [m]

$Q_t$  = utsläppshastigheten av LPG [kg/s] ( $1 < m < 3000$  kg/s)

$r_{s,50}$  = riskavstånd, åt sidan, inom vilket risken för dödlighet är 50% [m] ( $r > W$ )

t = exponeringstid [s] ( $10 < t < 300$  s)

Riskavståndet, för 50% dödlighet, vid flamspetsen är  $0.85 \cdot r_{s,50}$ .

### 5.2 Jetflammar från kolväten

För kolväten utom LPG kan följande korrelation utnyttjas. Denna korrelation ger enbart längden på flammen

$$L = 18.5 Q_t^{0.41} \quad 5.4$$

L = flammans längd [m]

$Q_t$  = utsläppshastighet [kg/s]

Uttrycket är framförallt avsett för utsläpp av vätska som flashar vid utsläppet.

## 6. FRIA GASMOLNSEXPLORIONER (UVCE)

Många allvarliga olyckor som inträffat i samband med utsläpp av kemikalier beror på att den utsläppta föreningen är brännbar och att det bildade gasmolnet har en sammansättning inom brännbarhetsgränserna. Om en tändkälla finns tillgänglig blir följden en gasmolnsexplosion. På engelska kallas detta förlopp "Unconfined Vapour Cloud Explosion" vilket förkortas UVCE. De allvarligaste skadorna vid en UVCE beror på den tryckvåg som alstras vid explosionen. För att man ska riskera att få en UVCE krävs ett relativt stort utsläpp. I litteraturen nämns massan 1000 kg som en ungefärlig nedre gräns för att resultatet vid ett utsläpp ska bli en gasmolnsexplosion.

För mycket reaktiva föreningar som t ex väte och acetylen kan det räcka med betydligt mindre mängder för en gasmolnsexplosion ( $\approx 100$  kg). Vid en UVCE skapas en tryckvåg. Storleksordningen på denna uppskattas vara 1 bar ( $10^5$  Pa) och varaktigheten 20–100 ms. Vid små utsläpp av brännbara föreningar där en tändkälla finns närvarande blir förloppet troligen en avbränning av gasmolnet utan att en tryckvåg alstras. Detta förlopp är känt under benämningen "flash fire".

För beräkningar av gasmolnsexplosioner och "flash fires" hänvisas till handböcker i ämnet t ex [13].

## 7. BLEVE OCH ELDKLOT

Vid ett plötsligt brott på en trycktank som innehåller en överhettad vätska eller en kondenserad gas kan man komma i en situation där en BLEVE uppkommer. BLEVE står för Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion. Det handlar här om ett våldsamt brott på en tank vilket innebär att en stor mängd vätska plötsligt släpps ut till atmosfären. Vid brottet på tanken kan stora tankfragment slungas iväg mycket långt från ursprungspositionen. Om den utsläppta vätskan är brännbar kan ett stort eldklot bildas som genom sin strålning kan åstadkomma ytterligare skador.

De flesta kända BLEVE berör olyckor där LPG-tankar har utsatts för brandpåverkan.

Ett flertal olika korrelationer har publicerats för beräkning av eldklot och effekterna av

en BLEVE. Nedan ges uttryck för eldklotsberäkningar. För beräkningar av tryckvåg och hur långt tankfragment kan slungas iväg hänvisas till annan litteratur.

### 7.1 Storleken på eldklot

Beräkningarna av storleken på det eldklot som kan uppstå vid en BLEVE kan göras med hjälp av följande uttryck:

Eldklotets största diameter  $D_{\max}$  [m]

$$D_{\max} = 6.48 m^{0.325} \quad 7.1$$

$m$  = ursprunglig massa brännbar vätska [kg]

Eldklotets varaktighet  $t_{\text{BLEVE}}$  [s] 7.2

$$t_{\text{BLEVE}} = 0.825 m^{0.26}$$

Eldklotets centrumhöjd  $H_{\text{BLEVE}}$  [m] 7.3

$$H_{\text{BLEVE}} = 0.75 D_{\max}$$

$D_{\max}$  beräknas enligt 7.1.

### 7.2 Strålning från eldklot

Det bildade eldklotet avger en kraftig strålning som naturligtvis kan åstadkomma stor skada på människor och konstruktioner. På liknande sätt som för pölbränder kan avgiven och mottagen strålning beräknas från ett eldklot.

Mottagen strålning  $q_x$  kan beräknas enligt nedan:

$$\dot{q}_x'' = \tau \dot{q}_r'' F_{21} \quad 7.4$$

$\tau$  = andel av strålningen som transmitteras genom luften

$\dot{q}_r''$  = avgiven strålning [kW/m<sup>2</sup>]

$F_{21}$  = synfaktor

$$\tau = 2.02 (p_w X)^{-0.09} \quad 3.12$$

$p_w$  = vattens ångtryck [Pa]  
 $X$  = avstånd mellan flamyta och mottagande föremål [m]

Ångtrycket för vatten vid temperaturer mellan 0°C och 30°C och för 100% relativ luftfuktighet ges i tabell 3.4. I ett verkligt fall måste  $p_w$  multipliceras med gällande relativ luftfuktighet.

$$\dot{q}_r'' = \frac{X_E m \Delta h_c}{\pi (D_{\max})^2 t_{\text{BLEVE}}} \quad 7.5$$

$\dot{q}_r''$  = avgiven strålning [kW/m<sup>2</sup>]  
 $X_E$  = strålningsandel (0.25 – 0.40)  
 $m$  = utsläppt massa brännbar vätska [kg]  
 $\Delta h_c$  = förbränningsvärme [kJ/kg]  
 $D_{\max}$  = eldklotets största diameter [m]  
 $t_{\text{BLEVE}}$  = eldklotets varaktighet [s]

Ofta är man intresserad av att ta reda på hur stora effekter en BLEVE kan få på människor, dvs hur långt från olycksplatsen som det finns risk för människor att få brännskador. Med hänsyn till detta väljes en synfaktor som gäller för strålning från en sfär till en yta vinkelrätt mot sfären.

$$F_{21} = \frac{D_{\max}^2}{4 X^2} \quad 7.6$$

$F_{21}$  = synfaktor för strålning från en sfär till en yta vinkelrätt mot sfären  
 $D_{\max}$  = sfärens diameter [m]  
 $X$  = avstånd från sfären till föremålets centrum [m].

## 8. SPRIDNING AV GASMOLN

Vid genomförandet av en konsekvensanalys är det ofta viktigt att kunna förutsäga något om spridningen i luften av den utsläppta kemikalien och därmed kunna få uppgifter om riskerna för omgivningen. Man skiljer på två typer av gasmolnsspridning och tre olika utsläpps-tidsförlopp:

Gasmolnsspridning

Neutrala och lätta gaser

Tunga gaser

Utsläppsförlopp

Momentant utsläpp

Kontinuerligt utsläpp

Kontinuerligt utsläpp som varierar med tiden

Spridning av lätta och neutrala gaser beskrivs sedan länge med Gaussiska modeller. Det gäller då utsläpp i vindriktningen och spridning med vindhastigheten. Dessa modeller kan även utnyttjas till att beskriva utsläpp av en tung gas på långa avstånd från utsläppskällan. Den ursprungliga gasen har då blivit så uttunnad att den har samma densitet som luft.

När det gäller beräkning av spridning bilden för ett gasformigt utsläpp är man i de flesta fall hänvisad till att utnyttja någon av de många datormodeller som finns framtagna. Det finns uttryck som gör det möjligt att manuellt beräkna spridningen av en lätt eller neutral gas. Nedan ges en beskrivning av hur man kan beräkna spridningen för en lätt eller neutral gas.

8.1 Spridning av en lätt eller neutral gas

Den beräkningsmetod som beskrivs här brukar benämnas Pasquill–Giffords metod. Den förutsätter Gaussisk spridning i både horisontell och vertikal led (enligt figur 8.1).

Ekvation 8.1 ger spridning från en upphöjd kontinuerlig punktkälla under antagande av att ingen del av utsläppet absorberas av marken och att ingen reaktion sker vid kontakt med marken.

$$C(x,y,z) = \frac{Q_g}{2\pi \sigma_y \sigma_z u} \left[ \exp \frac{-y^2}{2 \sigma_y^2} \right] \left[ \exp \frac{-(z-H)^2}{2 \sigma_z^2} + \exp \frac{-(z+H)^2}{2 \sigma_z^2} \right] \quad 8.1$$

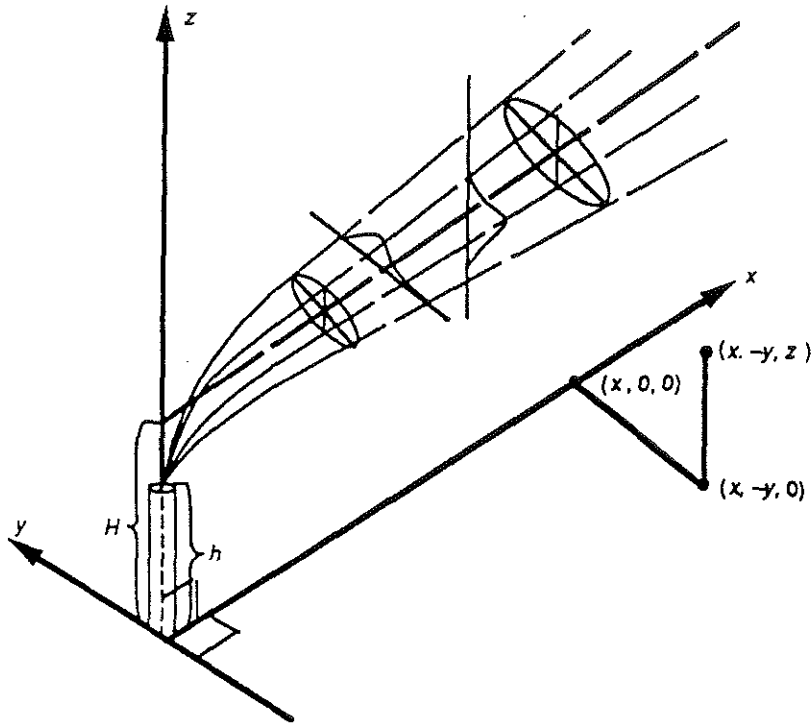
$x, y, z$  = avstånd från källan [m]

( $x$  = längs vindriktningen

$y$  = vinkelrätt mot vindriktningen

$z$  = vertikalt)

- $C$  = koncentrationen [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] vid punkten  $x, y, z$   
 $Q_{\text{gg}}$  = utsläppshastighet [ $\text{kg}/\text{s}$ ]  
 $H$  = utsläppskällans höjd över marken [ $\text{m}$ ]  
 $\sigma_y, \sigma_z$  = dispersionskoefficienter [ $\text{m}$ ]  
 $u$  = vindhastigheten [ $\text{m}/\text{s}$ ]



Figur 8.1 Tredimensionell bild av Gaussisk spridning från en upphöjd kontinuerlig källa [1]

Vindens hastighet varierar med höjden över marken. Det är viktigt att använda vindhastigheten för den höjd där beräkningarna görs. Enligt ekvation 8.2 kan en uppmätt hastighet korrigeras till rätt höjd.

$$u_z = u_{10} \left(\frac{z}{10}\right)^p \quad 8.2$$

- $u_z$  = vindhastighet på höjden  $z$  [ $\text{m}/\text{s}$ ]  
 $u_{10}$  = vindhastighet 10 m över marken [ $\text{m}/\text{s}$ ]  
 $z$  = höjd över marken [ $\text{m}$ ]  
 $p$  anges för olika förhållanden i tabell 8.1.

Anledningen till att vindhastigheten vid höjden 10 m över marken valts som referens är att man ofta mäter vindhastigheten på just denna nivå.



Tabell 8.1 Koefficienter för korrektion av vindhastigheten

Stabilitets- klass	Koefficienten p	
	Stadsbebyggelse	Jordbruksområde
A	0.15	0.07
B	0.15	0.07
C	0.20	0.10
D	0.25	0.15
E	0.40	0.35
F	0.60	0.55

Dispersionskoefficienterna  $\sigma_y$  och  $\sigma_z$  är beroende av väderleksförhållanden och varierar även med avståndet från utsläppskällan. Ofta ges  $\sigma_y$  och  $\sigma_z$  som grafer, se figur 8.2.

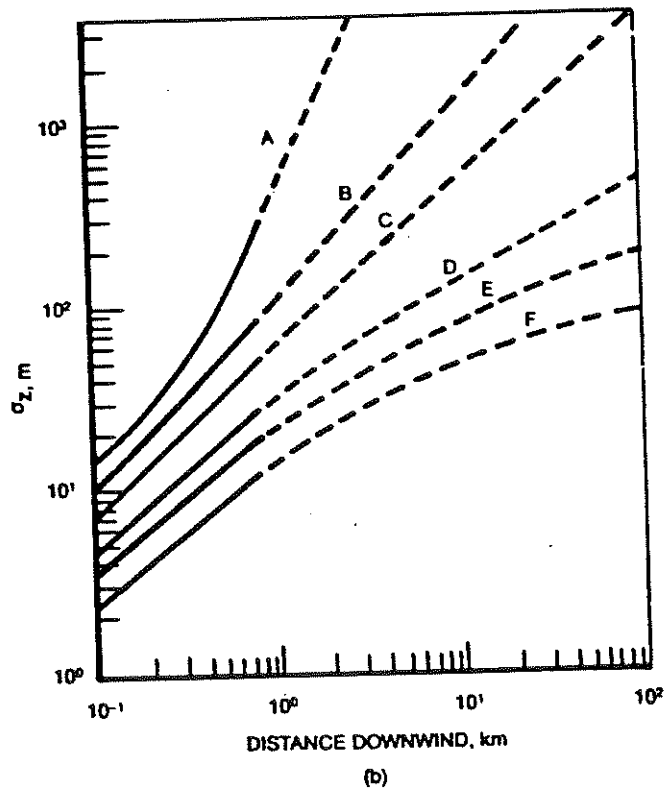
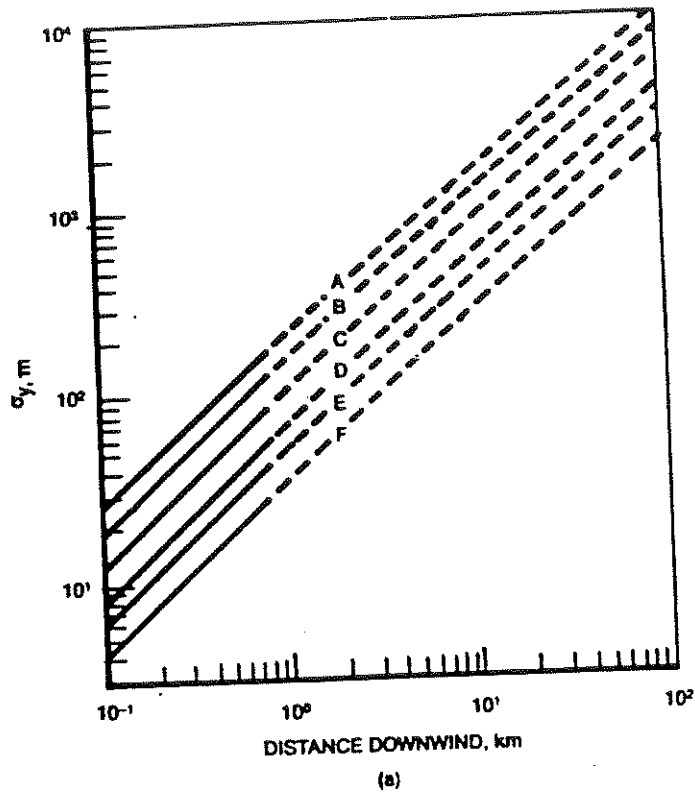
För specifika förhållanden anges de även som uttryck. Exempel för stabilitetsklass D och stadsbebyggelse ges här.

$$\sigma_y(x) = 0.16 \times (1 + 0.004x)^{-0.5} \quad 8.3$$

$$\sigma_z(x) = 0.14 \times (1 + 0.0003x)^{-0.5} \quad 8.4$$

x = avståndet från utsläppskällan [m]

För momentana utsläpp kan uttryck liknande 8.1 tecknas men svårigheterna att fastlägga värden på dispersionskoefficienterna blir större i detta fall. Någon genomgång görs därför inte här.



Figur 8.2 Gaussiska dispersionsparametrar:  
(a) horisontell och (b) vertikal

## 9. EFFEKTMODELLER

I avsnitten 2–8 presenteras olika metoder för att beräkna ett utsläpps storlek och spridning. För att kunna utnyttja dessa resultat i ett konstruktivt riskanalysarbete krävs effektmodeller som översätter beräkningsresultaten till de konsekvenser ett utsläpp får för omgivningen. De konsekvenser som här närmast avses är utsläppta kemikaliers giftighet, termisk påverkan från brand i utsläppta kemikalier eller skador p g a det övertryck som alstras vid en explosion. Nedan ges exempel på metoder för bedömning av giftighet och termisk påverkan.

### 9.1 Giftighet

Många olyckor med kemikalier ger upphov till utsläpp av giftiga föreningar. Om dessa sprids i luften kan de orsaka skador på människor och djur även på relativt stora avstånd från utsläppspunkten. Med hjälp av gasspridningsmodeller kan man beräkna koncentrationen på olika avstånd från utsläppet och därmed uppskatta hur långt bort det finns risk för skador. Det avgörande blir då att välja de koncentrationsnivåer som ska ligga till grund för bedömning av riskavstånd. För en del kemikalier är det väl känt hur de påverkar människan och vilka symptom de ger upphov till vid olika koncentrationsnivåer. I detta fall är det relativt enkelt att välja några koncentrationer som är intressanta och beräkna med hjälp av en gasspridningsmodell hur långt från utsläppet det finns risk för att dessa nivåer uppnås. Det finns emellertid många kemikalier där man inte har så stor kunskap om hur människor reagerar på olika koncentrationer. Då får man försöka utnyttja de uppgifter som går att hitta i litteraturen. Som absolut lägsta värde kan man välja något av de gränsvärden som anges i arbetarskyddsstyrelsens gränsvärdeslista. Dessa värden anger koncentrationer som är tillåtna att vistas i under en hel arbetsdag och måste därför ses som en minimigräns.

För att bedömma riskerna för människor på olika avstånd från utsläppet kan man utnyttja någon form av sannolikhetsfunktion som kopplar samman koncentration med påverkan på människa. Nedan följer en redovisning av hur en sådan metod kan utnyttjas.

$$c = \left[ \frac{e \cdot ((Pr-a)/b)}{t} \right]^{1/n} \quad \text{eller}$$

9.1

$$Pr = a + b \ln (c^n t)$$

9.2

c = koncentration [ppm]

t = exponeringstid [min]

a,b,n ämnesberoende konstanter, som hämtas ur tabell 9.1

Pr = probit-variabel

Genom att utnyttja tabell 9.2 kan värdet på Pr omtolkas till hur stor andel av de människor, som utsätts för den valda gaskoncentrationen, som kan dödas.

Om man utnyttjar Probit-metoden för att ta fram risken för människor att dödas på olika avstånd från ett utsläpp måste man vara väl medveten om att de värden som räknas fram är uppskattningar och endast kan utnyttjas för att göra ungefärliga bedömningar av riskavstånd.

## 9.2 Termisk påverkan

I de fall en brand uppstår till följd av ett kemikalieutsläpp är det av intresse att ta reda på hur människor och konstruktioner påverkas av den avgivna strålningsvärmens. I tabell 9.3 ges riktvärden för strålning och hur den påverkar människor och material. Skadans omfattning påverkas dels av strålningens intensitet men även av strålningens varaktighet.

Även när det gäller värmepåverkan på människor kan man utnyttja en Probit-funktion för att uppskatta sannolikheten för dödsfall vid en viss påverkansnivå.

$$Pr = -14.9 + 2.65 \ln (t \dot{q}_x^{4/3} 10^{-4})$$

9.3

Pr = Probit variabel

t = påverkanstid [s]

$\dot{q}_x$  = strålningsintensitet [W]

I tabell 9.4 ges värden på strålningsnivåer och samband mellan tid och sannolikhet för dödsfall.

När man tolkar strålningsnivåer kan det vara bra att veta att en varm klar sommardag är strålningen ungefär 1 kW/m<sup>2</sup>.

Tabell 9.1

Konstanter för att beräkna dödlig koncentration enligt Probit-metoden [1]

Ämne	a (ppm)	b (ppm)	n (min)
Acrolein	-9.931	2.049	1
Acrylonitril	-29.42	3.008	1.43
Ammoniak	-35.9	1.85	2
Bensen	-109.78	5.3	2
Brom	-9.04	0.92	2
Koloxid	-37.98	3.7	1
Koltetraklorid	-6.29	0.408	2.50
Klor	-8.29	0.92	2
Formaldehyd	-12.24	1.3	2
Väteklorid	-16.85	2.00	1.00
Vätecyanid	-29.42	3.008	1.43
Vätefluorid	-35.87	3.354	1.00
Vätesulfid	-31.42	3.008	1.43
Metylbromid	-56.81	5.27	1.00
Metylisocyanat	-5.642	1.637	0.653
Kvävedioxid	-13.79	1.4	2
Fosgen	-19.27	3.686	1
Propylenoxid	-7.415	0.509	2.00
Svaveldioxid	-15.67	2.10	1.00
Toluen	-6.794	0.408	2.50

Tabell 9.2

Omvandling av Probit-värden till procent [1]

%	0	2	4	6	8
0	—	2.95	3.25	3.45	3.59
10	3.72	3.82	2.92	4.01	4.08
20	4.16	4.23	4.29	4.36	4.42
30	4.48	4.53	4.59	4.64	4.69
40	4.75	4.80	4.85	4.90	4.95
50	5.00	5.05	5.10	5.15	5.20
60	5.25	5.31	5.36	5.41	5.47
70	5.52	5.58	5.64	5.71	5.77
80	5.84	5.92	5.99	6.08	6.18
90	6.28	6.41	6.55	6.75	7.05
99	7.33	7.41	7.46	7.65	7.88

Tabell 9.3

Strålning från brand, påverkan på människor och material

kW/m<sup>2</sup>

0.7	Rodnad på hud och vid lång exponering brännskada
1.75	Smärta på bar hud efter 60 s
2.0	Kablar isolerade med PVC skadas
5.0	Smärta på bar hud efter 15 s Motsvarar en temperatur på 230°C
6.4	Smärta på bar hud efter 8 s Andra gradens brännskador efter 20 s
9.5	Smärta på bar hud efter 6 s Motsvarar en temperatur på 320°C
12.5	Trä antänds vid lång exponering i närvaro av en pilotlåga
15.0	Motsvarar en temperatur på 390°C
16.0	Svåra brännskador efter 5 s
25.0	Trä antänds vid lång exponering
30.0	De flesta brännbara material antänds

Tabell 9.4

Strålnings- flöde [kW/m <sup>2</sup> ]	Erforderlig exponeringstid [s] för att ge en viss andel dödsfall [%]		
	1%	50%	99%
1.6	500	1300	3200
4.0	150	370	930
12.5	30	80	200
37.5	8	20	50

De skador som anges i tabell 9.3 för olika strålningsnivåer avser påverkan mot oskyddad hud. Personer som bär tjocka kläder eller hinner söka skydd klarar naturligtvis värmepåverkan mycket bättre.

Här har getts exempel på hur man kan uppskatta skador på människor. Det går även att uppskatta skador och påverkan på byggnader och konstruktioner. När det gäller denna typ av beräkningar görs inte någon genomgång här utan hänvisning ges till litteratur och datorprogram inom detta område.

## 10. BERÄKNINGSEXEMPEL

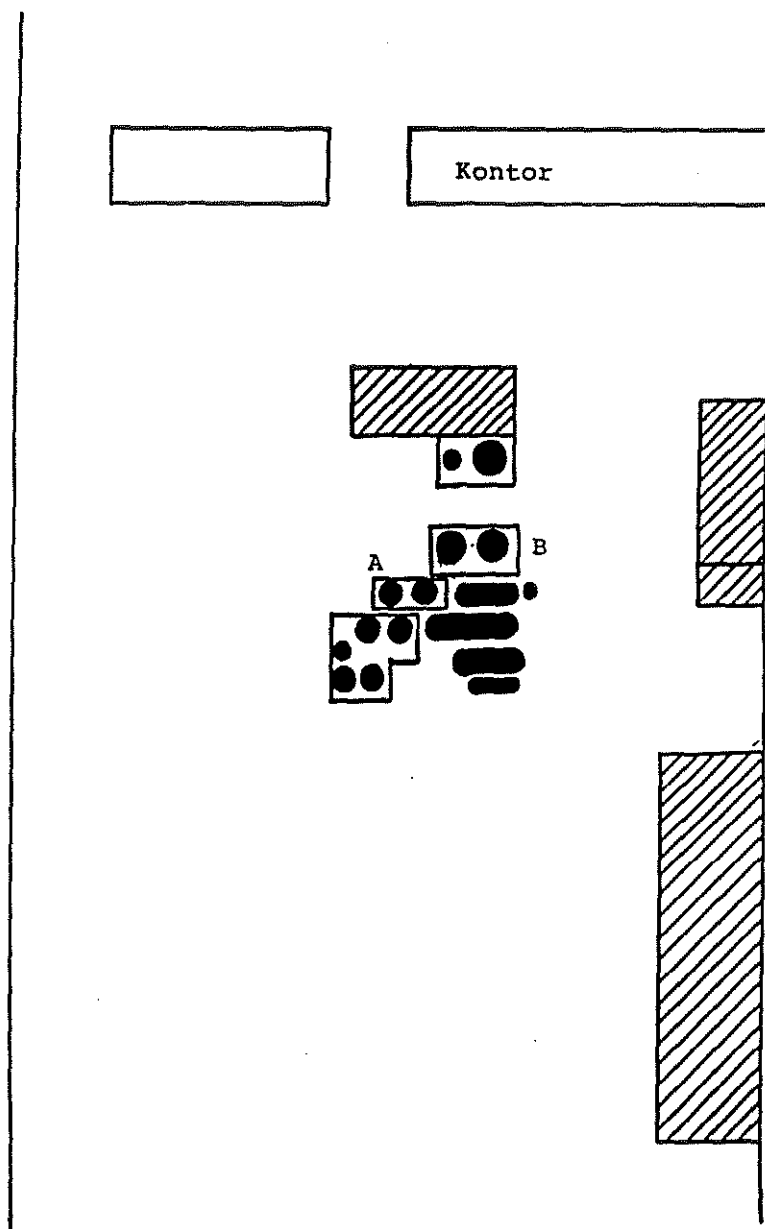
Nedan presenteras några beräkningsexempel på hur de i tidigare avsnitt redovisade beräkningsmetoderna kan användas i verkliga situationer.

Typfallen är valda från det arbete som under 1989 pågick inom projektet RAM (Riskanalys i Malmöhus län). Inom detta projekt studerades fyra representativa verksamhetstyper:

- \* kemikalieindustri
- \* livsmedelsindustri
- \* farmaceutisk industri
- \* byggmaterialindustri

10.1 Lagring av aceton utomhus

Vid den analyserade industrin lagras stora mängder kemikalier utomhus, bl a i en tankfarm där det finns följande, 40 m<sup>3</sup> aceton, 45 m<sup>3</sup> toluen och 50 m<sup>3</sup> toluen (15 vol%). Inom samma område, som har en area på 400 m<sup>2</sup>, lagras även trietylamin, svavelsyra och myrsyra. Närmsta byggnad finns på ett avstånd av 20 m. Tankarna står i invallningar och deras placering i tankfarmen framgår av figur 10.1.

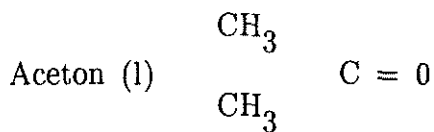


Figur 10.1 Plan över tankfarmen vid en kemisk industri. De analyserade acetontankarna finns vid A. Vid B lagras toluen. I övriga tankar lagras syror av olika slag. Streckade ytor är produktionslokaler



En möjlig händelse är att man får ett rörbrott vid en acetontank. Aceton strömmar ut och antänds. Eftersom det saknas avstängningsventiler på tanken kommer tanken att tömmas. Pölbranden som följer efter antändning värmer upp den andra acetontanken och denna rämnar så småningom om det inte görs någon insats för att kyla den eller släppa ut övertrycket. Om tank två rämnar kan den utsläppta acetonen ge upphov till ett eldklot som utsätter omgivningen för en kraftig värmestrålning. De båda acetontankarna står i en gemensam invallning.

### Förutsättningar



Densitet = 791.5 kg/m<sup>3</sup>

Kokpunkt = 56°C

Ångtryck för aceton vid 20°C = 216 mm Hg

Lagringstemperatur = 20°C

Vindhastighet = 2 m/s

Relativ luftfuktighet = 60%

### Tank

Vertikal cylinder

Diameter = 2.82 m

Höjd = 4.0 m

Volym = 25 m<sup>3</sup>

Fyllnadsgrad = 85%

### Invallning

Längd = 8.8 m

Bredd = 4.8 m

Höjd = 1.0 m

### Rör

Diameter = 0.1 m

10.1.1 Beräkning av tankens utsläppstid och utsläppshastighet

Acetonen lagras vid atmosfärstryck och är en vätska vid 20°C.

Utnyttja ekvationerna 2.3 och 2.2 för att beräkna utsläppstid och utsläppshastighet.

– Utsläppstid = total tömningstid beräknas enligt ekvation 2.3.

$$t = (1.67 \cdot a/A)(2 H_0/g)^{0.5}$$

$$a = \text{tankens tvärsnittsyta} = 6.246 \text{ m}^2$$

$$A = \text{utsläppsöppningens area} = 7.85 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$H_0 = \text{ursprunglig vätskehöjd} = 0.85 \cdot 4.0 = 3.4 \text{ m}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$t = 1106 \text{ s} \approx \underline{18 \text{ min}}$$

– Utsläppshastigheten vid en viss tid kan beräknas enligt ekvation 2.2

$$Q_1(t) = [0.6 A \rho_1 (2g H_0)^{1/2} - t(0.6 A)^2 \rho_1 g/a]$$

Här väljer vi att beräkna utsläppshastigheten efter ungefär halva utsläppstiden,  $t = 500 \text{ s}$ .

$$A = \text{utsläppsöppningens area} = 7.85 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\rho_1 = \text{vätskans densitet} = 791.5 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$H_0 = \text{ursprunglig vätskehöjd} = 0.85 \cdot 4.0 = 3.4 \text{ m}$$

$$t = \text{tid från utsläppets start} = 500 \text{ s}$$

$$a = \text{tankens tvärsnittsyta} = 6.246 \text{ m}^2$$

$$Q_1 = \underline{13.8 \text{ kg/s}}$$

Vill man ha ett värde på utströmningshastigheten som är oberoende av tiden kan en grov uppskattning göras genom att dividera total massa med total utsläppstid

$$Q_1 = m/t$$

$$\begin{aligned}
 m &= \text{total massa aceton} = 0.85 \cdot 791.5 \cdot 25 = 16.82 \cdot 10^3 \text{ kg} \\
 t &= \text{total utsläppstid} = 1106 \text{ s} \\
 \dot{Q}_1 &= \underline{15.2 \text{ kg/s}}
 \end{aligned}$$

### 10.1.2 Beräkning av förångningstid och förångningshastighet

Med hjälp av uttrycken 2.21–2.26 kan förångningshastigheten för aceton i en pöl på marken beräknas. Dessa ekvationer måste utnyttjas eftersom acetons kokpunkt ligger över temperaturen i omgivningen. Kokpunkten för aceton är 56°C och omgivningens temperatur är 20°C.

– Utnyttja ekvationerna 2.21 – 2.26

$$\dot{Y}_{FW} = 1/[1 + [(p/p_F)-1] \cdot (M_{\text{luft}}/M_F)]$$

$$\begin{aligned}
 p &= \text{luftryck} = 760 \text{ mm Hg} \\
 p_F &= \text{ångtryck för aceton vid } 20^\circ\text{C} = 216 \text{ mm Hg} \\
 M_{\text{luft}} &= \text{molekylvikten för luft} = 28.85 \text{ g/mol} \\
 M_F &= \text{molekylvikten för aceton} = 58.08 \text{ g/mol}
 \end{aligned}$$

$$Y_{FW} = \underline{0.444}$$

$$B = (Y_{F\infty} - Y_{FW})/(Y_{FW} - Y_{FR})$$

Om luften ovanför bränslet är fri från bränsle kan  $Y_{F\infty}$  sättas = 0. Om det flytande bränslet är rent och inte innehåller någon löst gas sätts  $Y_{FR} = 1$ .

Antag att ovanstående förutsättningar gäller här.

$$B = \underline{0.8}$$

$$Re = u \cdot D/\nu$$

$$\begin{aligned}
 u &= \text{vindhastigheten} = 2 \text{ m/s} \\
 D &= \text{pölens diameter} = 7.3 \text{ m} \\
 \nu &= \text{kinematisk viskositet för luft} = 15.08 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}
 \end{aligned}$$

$$Re = \underline{9.68 \cdot 10^5}$$

$$Nu = 0.037 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr_{\text{luft}}^{1/3}$$

$$Pr_{\text{luft}} = \text{Prandtl's tal för luft} = 0.71$$

$$Nu = \underline{2029}$$

$$h = Nu \cdot k_{\text{luft}}/D$$

$$k_{\text{luft}} = \text{konduktivitet för luft} = 0.02568 \text{ W/mK}$$

$$h = \underline{7.14 \text{ W/m}^2 \text{ K}}$$

$$\dot{m}''_s = (h/C_{p_{\text{luft}}}) \cdot \ln(1 + B)$$

$$C_{p_{\text{luft}}} = \text{värmekapacitet för luft} = 1 \text{ J/g K}$$

$$\dot{m}''_s = \underline{4.20 \text{ g/m}^2\text{s}}$$

– Beräkna den totala förångningen från pölen

$$\dot{m}_s = \dot{m}''_s \cdot A_p$$

$$A_p = 42.24 \text{ m}^2$$

$$\dot{m}_s = 177.4 \text{ g/s} = \underline{0.177 \text{ kg/s}}$$

– Beräkna total förångningstid för hela pölen.

$$t = m/\dot{m}_s$$

$$m = \text{total massa aceton i pölen} = 16.82 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

$$t = 95028 \text{ s} = \underline{26.4 \text{ h}} \approx 1 \text{ dygn}$$

10.1.3 Beräkning av strålning från en brand i acetonpöl

Enligt genomförda beräkningar tar det lång tid för den utsläppta acetonen att förångas. Detta innebär stor risk för en pölbrand. Utnyttja uttrycken i avsnitt 3.4 för att beräkna strålningen från branden.

– Beräkna totalt avgiven effekt enligt ekvation 3.10

$$\dot{q} = \dot{m}'' \cdot \Delta h_c \cdot A_p$$

$\dot{m}''$  = förbränningshastighet per ytenhet [kg/m<sup>2</sup> s]

$\Delta h_c$  = effektivt förbränningsvärme för aceton = 25.8 MJ/kg (ur tabell 3.1)

$A_p$  = pölens area = 42.24 m<sup>2</sup>

Utnyttja beräkningsmetoden i 3.1 för att beräkna  $\dot{m}''$

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} (1 - e^{-k\beta D})$$

$\dot{m}''_{\infty}$  = 0.041 kg/m<sup>2</sup>s (ur tabell 3.1)

$k\beta$  = 1.9 m<sup>-1</sup> (ur tabell 3.1)

$D$  = pölens diameter = 7.3 m

$$\dot{m}'' = \underline{0.041 \text{ kg/m}^2 \text{ s}}$$

Inverkan av pölens diameter är här helt försumbar

$$\dot{q} = \underline{44.68 \text{ MW}}$$

– Beräkna avgiven strålning

Enligt avsnitt 3.4.2 kan strålningsandelen  $X_E$  vid brand i en acetonpöl antagas till 0.3

$$\dot{q}_r = 0.3 \cdot 44.68 = \underline{13.4 \text{ MW}}$$

– Beräkna den strålning som absorberas i atmosfären

Utnyttja uttryck 3.12

$$\tau = 2.02 (p_w X)^{-0.09}$$

$p_w$  = ångtryck för vatten = 2310 Pa vid 20°C (ur tabell 3.4)

Efter reducering för relativ luftfuktighet:  $p_w = 1386$  Pa

X = avstånd mellan flammen och mottagande objekt

Genomför beräkningar för avstånden 20 m, 50 m, 100 m, 200 m

$$20 \text{ m: } \tau = 0.804$$

$$50 \text{ m: } \tau = 0.741$$

$$100 \text{ m: } \tau = 0.696$$

$$200 \text{ m: } \tau = 0.654$$

– Beräkna synfaktorn enligt 3.13

$$F_p = \frac{1}{4\pi X^2}$$

Beräkningen görs för avståndet X = 50 m.

$$F_p = 3.18 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-2}$$

– Beräkna mottagen strålning för ett föremål 50 m från pölbranden enligt 3.14

$$\dot{q}_x'' = \tau \cdot \dot{q}_r \cdot F_p$$

$$\dot{q}_{50}'' = 316 \text{ W/m}^2$$

– Beräkna flamhöjden vid brand i acetonepölen enligt 3.8 och 3.9

$$H = 55 \left[ \frac{\dot{m}''}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0.67} u^{*-0.21} \cdot D$$

$$u^* = u / \left[ \frac{\dot{m}'' D}{\rho_v} \right]^{1/3}$$

$$\dot{m}'' = \text{förbränningshastighet per ytenhet} = 0.041 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$\rho_a = \text{luftens densitet} = 1.19 \text{ kg/m}^3$$

$$D = \text{pölens diameter} = 7.3 \text{ m}$$

$$u = \text{vindhastighet} = 2 \text{ m/s}$$

$$\rho_v = \text{vätskans ångdensitet} = 0.420 \text{ kg/m}^3$$

$$u^* = 1.047$$

$$H = \underline{9.95 \text{ m}}$$

#### 10.1.4 Beräkning av uppvärmning av behållare

En pölbrand i invallningen runt acetontankarna medför en kraftig påverkan på dessa. Behållare 2 som fortfarande innehåller aceton är omgiven av flammor. Tanken värms upp och småningom erhålls ett kraftigt övertryck i behållaren. Vid ett övertryck på 1 atm finns det risk för att behållaren rämnar. Säkerhetsventiler på tankar är inte konstruerade för att ta hand om den här typen av situationer. De ger inte tillräcklig tryckavlastning. Ett övertryck på 1 atm motsvarar en temperatur i acetonen på 78.6°C.

– Beräkna tiden för uppvärmning av tanken till 78.6°C. Utnyttja uttrycken i avsnitt 4

$$(T(t) - T_g)/(T_0 - T_g) = e^{-t/\tau(\text{tank})}$$

$$\tau(\text{tank}) = C \cdot \rho_l \cdot V/h_{\text{luft}} \cdot A_t$$

$$T(t) = \text{temperatur i tanken vid tiden } t = 78.6^\circ\text{C} = 351.6 \text{ K}$$

$$T_g = \text{gastemperaturen i flammen} = 1100 \text{ K}$$

$$T_0 = \text{vätskans begynnelsestemperatur} = 293 \text{ K}$$

$$t = \text{tid [s]}$$

$$\tau(\text{tank}) = \text{tidskonstant [s]}$$

$$C_{pl} = \text{värmekapacitivet för aceton} = 2200 \text{ J/kg K}$$

$$\rho_l = \text{densitet för aceton} = 791.5 \text{ kg/m}^3$$

$$V = \text{volym} = 2.12 \text{ m}^3$$

$$h_{\text{luft}} = \text{värmeövergångstal för luft} = 100 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$A_t = \text{area som är utsatt för strålning (behållarens mantelyta)} = 35.44 \text{ m}^2$$

$$\tau(\text{tank}) = 10416 \text{ s}$$

$$t = 785 \text{ s} = \underline{13 \text{ min}}$$

Efter ca 13 min finns det alltså risk för att behållare 2 går sönder och ytterligare acetone släpps ut. Denna aceton är då redan uppvärmd och expanderar snabbt när tanken rämnar. Ett momentant utsläpp av aceton blir följden. Eftersom det brinner runt utsläppet är risken stor för att ett eldklot kan bildas.

#### 10.1.5 Beräkning av storleken på ett eldklot vid acetonutsläpp

Enligt ekvationerna 7.1 – 7.3 kan eldklotets storlek och varaktighet beräknas

– Beräkna eldklotets största diameter

$$D_{\text{max}} = 6.48 \text{ m}^{0.325}$$

$$m = \text{ursprunglig massa brännbar vätska} = 16.8 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

$$D_{\text{max}} = \underline{153 \text{ m}}$$

– Beräkna eldklotets varaktighet

$$t = 0.825 \text{ m}^{0.26}$$

$$t_{\text{BLEVE}} = \underline{10.3 \text{ s}}$$

– Beräkna eldklotets centrumhöjd

$$H_{\text{BLEVE}} = 0.75 D_{\text{max}}$$

$$H_{\text{BLEVE}} = \underline{115 \text{ m}}$$



10.1.6 Beräkning av strålning från eldklot

Strålningen från det bildade eldklotet kan beräknas enligt avsnitt 7.2

$$\dot{q}_x'' = \tau \dot{q}_r'' F_{21}$$

$$\dot{q}_r'' = \frac{X_E \cdot m \Delta h_c}{\pi (D_{\max})^2 t_{\text{BLEVE}}}$$

$$\tau = 2.02 (p_w X)^{-0.09}$$

$$F_{21} = \frac{D_{\max}^2}{4X^2}$$

$\tau$  = andel av strålningen som transmitteras genom luften

$\dot{q}_r''$  = avgiven strålning [kW/m<sup>2</sup>]

$F_{21}$  = synfaktor

$X_E$  = strålningsandel = 0.30

$m$  = totalt utsläppt massa =  $16.8 \cdot 10^3$  kg

$\Delta h_c$  = effektivt förbränningsvärme = 25.8 MJ/kg (ur tabell 3.1)

$D_{\max}$  = 153 m

$t_{\text{BLEVE}}$  = 10.3 s

$p_w$  = vattens ångtryck vid 20°C = 2310 Pa (ur tabell 3.4)

Efter reduktion p g a gällande relativ luftfuktighet blir  $p_w = 1386$  Pa

$X$  = avstånd mellan flamyta och mottagande föremål [m]

Beräkningarna görs för avstånden 100 m, 200 m, 300 m, 500 m

X (m)	$F_{21}$	$\tau$	$\dot{q}_x''$ [kW/m <sup>2</sup> ]
100	0.585	0.696	69.9
200	0.146	0.654	16.4
300	0.065	0.630	7.0
500	0.023	0.602	2.4

## 10.2 Lagring av gasol

Inom industrin används på sina håll stora mängder gasol. Nedan redovisas beräkningar för utsläpp av gasol = propan från en lagringstank som innehåller 10 ton. Ett rör anslutet till gasfasen med diametern 0.05 m skadas och propan släpps ut.

### 10.2.1 Beräkning av utsläppshastighet och tömningstid

Förutsättningar

Lagringstryck = 9.62 bar

Temperatur = 25°C

Ångtryck för propan vid 25°C = 9.622 bar

$$\gamma = c_p/c_v = 1.13$$

– Bestäm typ av utsläpp

Eftersom trycket i tanken är lägre än ångtrycket för propan vid 25°C sker utsläppet som ren gas. Utnyttja därför uttrycken i avsnitt 2.6.

– Bestäm utsläppsområde

$$r_{\text{crit}} = [(\gamma + 1)/2]^{\gamma/(\gamma - 1)}$$

$$\gamma = c_p/c_v = 1.13$$

$$r_{\text{crit}} = 1.73$$

$$\frac{p_s}{p_a} = 9.6$$

$$\rightarrow r_{\text{crit}} < \frac{p_s}{p_a}$$

– Beräkna utsläppshastighet, utnyttja ekvation 2.8

$$\dot{Q}_g = C_d \cdot A \cdot p_s \left\{ (\gamma M/R^* T_s) [2/(\gamma+1)]^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \right\}^{0.5}$$

$$C_d = 0.8$$

$$M = 44.009 \text{ kg/kmol}$$

$$R^* = 8310 \text{ J/kmol K}$$

$$T_s = 298 \text{ K}$$

$$A = 1.96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$p_s = 9.62 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\dot{Q}_g = \underline{4.0 \text{ kg/s}}$$

– Beräkna utsläppstid

Hela tankvagnen innehåller 10 ton. Med en utsläppshastighet på 4.0 kg/s skulle det ta ungefär 42 min att tömma tanken. Eftersom trycket sjunker i tanken när gas släpps ut kommer tiden i ett verkligt fall att bli längre.

### 10.2.2 Beräkning av jetflammans storlek och av riskavstånd

Utnyttja uttrycken i 5

– Beräkna jetflammans längd

$$L = 9.1 \dot{Q}_t^{0.5}$$

$$\dot{Q}_t = \text{utsläppshastighet} = 4.0 \text{ kg/s}$$

Uttrycket 5.1 uppges vara giltigt inom intervallet  $1 < m < 3000 \text{ kg/s}$

$$L = \underline{18.2 \text{ m}}$$

– Beräkna jetflammans bredd

$$W = 0.25 L$$

$$W = \underline{4.55 \text{ m}}$$

W anger flammans halva bredd vid flamspetsen. Hela flammans bredd blir alltså 9.1 m

– Beräkna riskavstånd för 50% dödlighet

Beräkningarna görs för tiderna 120 s och 600 s

$$r_{s,50} = 1.9 \cdot t^{0.4} \cdot Q_t^{0.47}$$

$$t = 120 \text{ s}$$

ger

$$r_{s,50} = \underline{25 \text{ m}}$$

$$t = 600 \text{ s}$$

ger

$$r_{s,50} = \underline{47 \text{ m}}$$

De beräknade avstånden ger riskerna åt sidan från jetflamman. Vid flamspetsen anges riskavstånden till 85% av  $r_{s,50}$ .

$$\text{För } t = 120 \text{ s blir } r = 21 \text{ m}$$

$$t = 600 \text{ s blir } r = 40 \text{ m}$$

## 11. BESKRIVNING AV NÅGRA TILLGÄNGLIGA DATORPROGRAM, JÄMFÖRANDE BERÄKNINGAR

Inom området konsekvensberäkningar finns ett stort utbud av kommersiella datorprogram. Några av dessa samt några forskarprogram har utnyttjats för att genomföra konsekvensberäkningar för 5 typfall. Med forskarprogram avses program som är framtagna av respektive forskare eller institution främst för internt bruk. De resultat som redovisas gäller främst spridning av gas från utsläpp av kondenserade gaser.

Följande kommersiella datorprogram har utnyttjats:

CHEMS-PLUS, version 1.0, July 1988 från Arthur D. Little, Inc.

WHAZAN från Technica International Ltd.

CAMEO II (Computer-Aided Management of Emergency Operations) från NOAA, National Safety Council, US Environmental Protection Agency.

Följande forskarprogram har använts:

HEAVY-PUFF utvecklat av M Nielsen och S Ott vid Risö forskningscenter, Danmark.

GREAT utvecklat av S Ott vid Risö forskningscenter, Danmark.

SLAB utvecklat vid Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, USA.

DEGADIS utvecklat av J A Havens och T O Spicer vid Department of Chemical Engineering, University of Arkansas, USA.

## 11.1 Kortfattad beskrivning av använda datorprogram.

### 11.1.1 CHEMS-PLUS

CHEMS-PLUS utgörs av ett programpaket innehållande beräkningsmodeller för olika typer av konsekvensberäkningar såsom utsläppshastigheter, förångningshastigheter, gas-spridningshastigheter, flamlängder, gasmolnsexplosioner och tankbrott. I tabell 11.1 ges en förteckning över de beräkningsmodeller som ingår och i figurerna 11.1 och 11.2 ges blockschema över hur de olika modellerna kan kopplas samman. Resultaten ges dels i form av grafer och dels i tabellform. Dessutom får man en sammanställning över indata och slutresultat. Utöver rena beräkningsmodeller finns även effektmodeller inlagda där bedömningar görs av avstånd till olika påverkansnivåer. Programpaketet innehåller dessutom en omfattande databas över kemikalier och deras egenskaper.

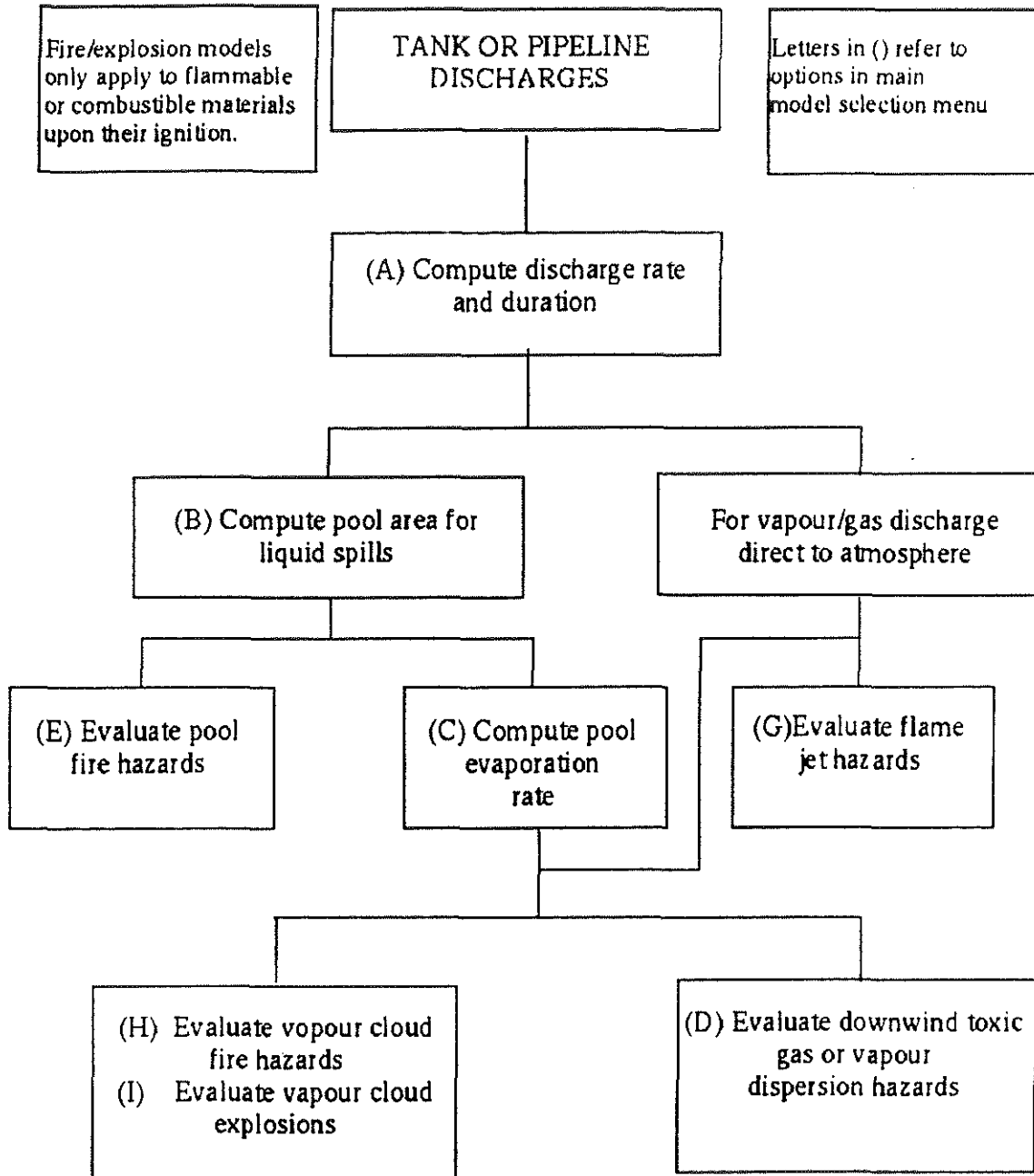
Tabell 11.1 Förteckning över de beräkningsmodeller som ingår i CHEMS-PLUS

<u>Hazard Assessment Model Selection Menu</u>	
(A)	Estimate discharge rate of liquid or gas
(B)	Estimate area of liquid pool
(C)	Estimate vapourization rate of liquid pool
(D)	Estimate toxic vapour dispersion hazard
(E)	Estimate pool fire radiation hazard
(F)	Estimate fireball radiation hazards
(G)	Estimate flame jet hazards
(H)	Estimate vapour cloud/plume fire hazards
(I)	Estimate vapour cloud explosion hazards
(J)	Estimate tank overpressurization rupture hazard
(K)	Estimate solid/liquid explosion hazard (High Explosive Detonation)
(L)	Units conversion utility

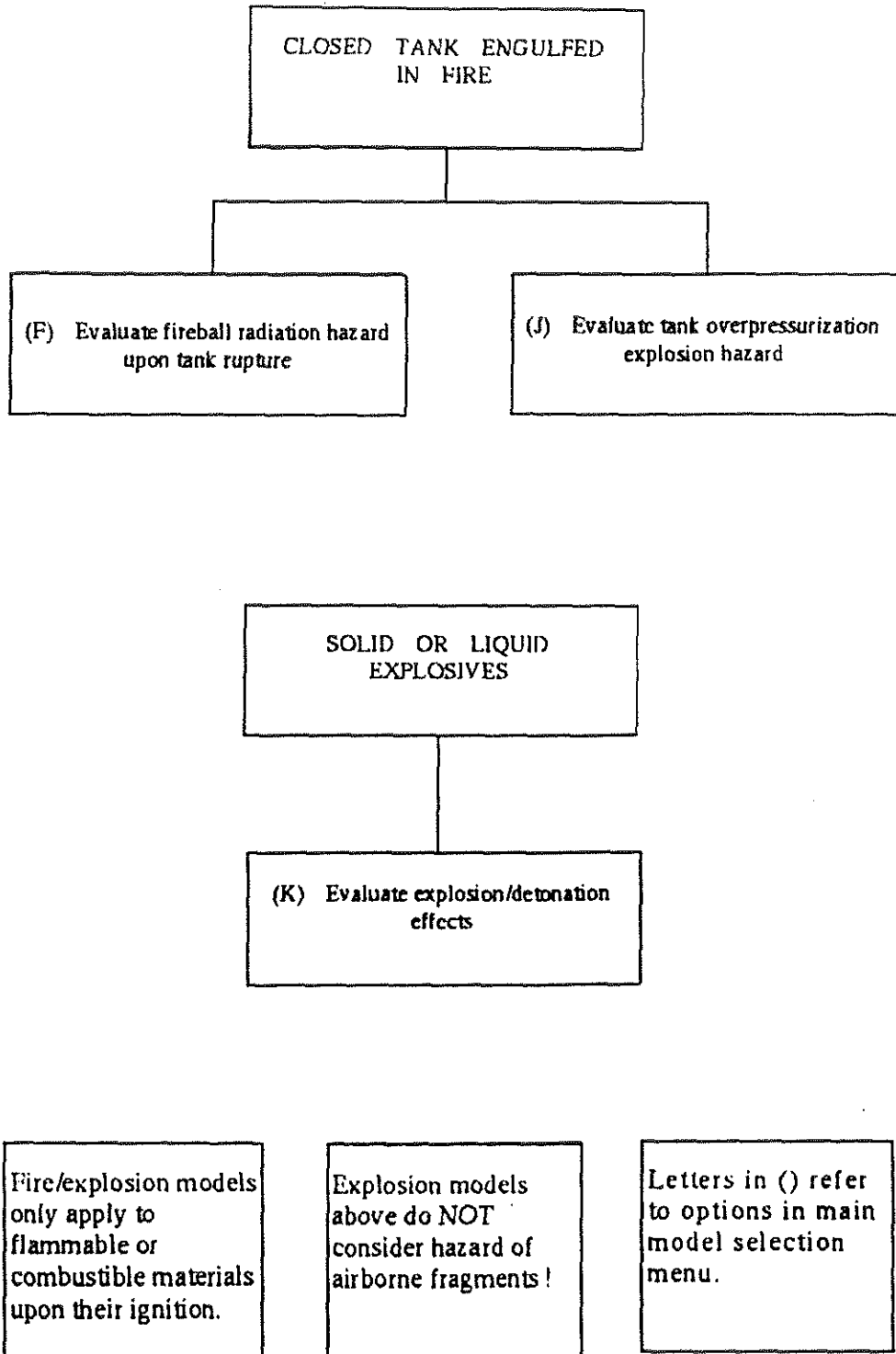
#### 11.1.2 WHAZAN (World Bank Hazard Analysis)

WHAZAN är en samling av beräkningsprogram som gör det möjligt att göra uppskattningar av troliga konsekvenser vid oplanerade utsläpp av giftiga och/eller brännbara gaser eller vätskor. I WHAZAN finns också ett bibliotek med omfattande kemiska och fysikaliska data för 20 vanliga kemikalier. (Utrymme finns för att komplettera detta bibliotek med upp till 100 kemikalier.) De beräkningsprogram som ingår i WHAZAN täcker följande områden:

- utflöde av en kemikalie
- hur kemikalien uppträder omedelbart efter utsläpp
- spridning i atmosfären
- brand och explosion



Figur 11.1 Blockschema över beräkning av risker vid ett utsläpp från tank eller rör, från CHEMS-PLUS



Figur 11.2 Blockschema över beräkningar för tankar omgivna av brand och av risker och effekter vid explosion, från CHEMS-PLUS



Dessa beräkningsprogram kan köras individuellt och de olika resultaten kan kopplas samman av den som kör programmet. Dessutom finns möjligheten att koppla samman modellerna så att programmet med hjälp av givna ingångsdata utnyttjar de ingående modellerna och delresultaten och endast presenterar ett slutresultat med angivande av vilka konsekvenser som är möjliga vid den givna situationen. Resultaten presenteras dels i form av grafer och dels i sammanställningar över indata och beräkningsresultat.

#### 11.1.3 CAMEO II (Computer-Aided Management of Emergency Operations)

Uppbyggnaden av CAMEO II skiljer sig avsevärt från de tidigare beskrivna programpaketen CHEMS-PLUS och WHAZAN. CAMEO II är utvecklat för att göra det möjligt att med kunskap om tillgängliga resurser ta fram insatsplaner för kemikalieolyckor. I CAMEO lagras kartor och information om räddningsstyrkor. En omfattande databas med data över kemikalier finns även i programpaketet.

Beräkningsdelen i CAMEO II utgörs av en modell för gasspridningsberäkningar. En modell för beräkning av förångningshastigheten från en vätskepöl finns också. Resultaten från beräkningarna ges som koncentrationsprofiler så att riskavstånd kan bestämmas.

#### 11.1.4 HEAVY-PUFF

HEAVY-PUFF är ett beräkningsprogram som behandlar ett momentant utsläpp av en tung gas. Koncentrationsprofiler och avstånd till olika koncentrationer kan beräknas. Beräkningarna tar hänsyn till väder- och terrängförhållanden. Resultaten erhålles som grafer och i tabellform.

#### 11.1.5 GREAT

GREAT behandlar momentana och kontinuerliga utsläpp av tunga och neutrala gaseer. Koncentrationsprofiler horisontellt och vertikalt samt avstånd till olika koncentrationer kan beräknas. Liksom i HEAVY-PUFF tas hänsyn till väder och terrängförhållanden. Resultaten erhålles som grafer, i tabellform och som koncentrationsprofiler i färggrafik.

#### 11.1.6 SLAB

SLAB beräknar gasspridning för tunga gaser vid momentana och kontinuerliga utsläpp. Utsläppen kan vara i form av en pöl som förångas, en horisontell jetstråle eller en ver-

tikal jetstråle. Vid beräkningarna tas hänsyn till väder- och topografiförhållanden. Programmet beräknar koncentrationen av den utsläppta kemikalien som funktion av avståndet från utsläppspunkten. Resultaten kan endast erhållas i tabellform.

### 11.1.7 DEGADIS

DEGADIS kan dels beräkna spridning av gasmoln som bildas vid förångning av en utspild vätska och dels utsläpp från en vertikal jetstråle. Modellen är anpassad för utsläpp av tunga gaser och ger som resultat koncentrationer på olika avstånd från utsläppet.

### 11.2 Några resultatjämförelser från utnyttjade datorprogram

#### Exempel 1.

Detta scenario beskriver ett utsläpp vid marken av ammoniak från en trycksatt tank. Utsläppet beror på en skadad ventil alldeles invid tanken. Ammoniaken förvaras under tryck (8.9 bar) och har samma temperatur som omgivningen. Eftersom utsläppet sker nertill på tanken handlar det här om ett rent vätskeutsläpp på 21.5 kg/s.

Beräkningar har gjorts för tre olika vädersituationer. Nedan redovisas koncentrationen i ppm på avståndet 1 km från utsläppspunkten.

i: Stabilitetsklass D, vindhastighet 2 m/s och ytråheten  $z_0 = 0.3$  m

Gaussisk modell	DEGADIS	CHEMS	WHAZAN
758	814	1064	605

ii: Stabilitetsklass D, vindhastighet 5 m/s och ytråhet  $z_0 = 0,3$  m

Gaussisk modell	DEGADIS	CHEMS	WHAZAN
303	308	426	246

iii: Stabilitetsklass F, vindhastighet 2 m/s och ytråhet  $z_0 = 0,3$  m

Gaussisk modell	DEGADIS	CHEMS	WHAZAN
4674	849	4660	3429

Kommentarer: Stabilitetsklass D brukar ofta anses som normalvädret under dagtid och stabilitetsklass F för nattid. Att resultaten skiljer sig mellan de olika beräkningarna beror på att de olika programmen utnyttjar olika beräkningsmodeller. Resultaten för den Gaussiska modellen och för DEGADIS är tagna från resultat presenterade i [2].

Exempel 2.

Detta scenario är nästan identiskt med exempel 1. Förutsättningarna är helt de samma men brottet sker på ett rör 3.75 m från tanken men fortfarande nere vid marken. Eftersom läckan är i ett rör en bit bort från tanken kommer det här att röra sig om ett tvåfasflöde på 5.42 kg/s. Liksom i exempel 1 redovisas beräkningarna för tre vädersituationer. Koncentrationen i ppm på avståndet 1 km från utsläppet redovisas nedan.

i. Stabilitetsklass D, vindhastighet 2 m/s och ytråheten  $z_0 = 0,3$  m

Gaussisk modell	DEGADIS	CHEMS	WHAZAN	GREAT
191	209	269	141	202

ii: Stabilitetsklass D, vindhastighet 5 m/s och ytråheten  $z_0 = 0,3$  m

Gaussisk modell	DEGADIS	CHEMS	WHAZAN	GREAT
77	79	108	55	70

iii: Stabilitetsklass F, vindhastighet 2 m/s och ytråheten  $z_0 = 0,3$  m

Gaussisk modell	DEGADIS	CHEMS	WHAZAN
1176	302	1196	842

Kommentarer: Resultaten för beräkningarna med Gaussisk modell och DEGADIS är tagna från [2].

## Exempel 3.

Detta scenario omfattar en tank med kondenserad klorgas. Klorgasen lagras under tryck (7.11 bar) och vid omgivningens temperatur (30°C). Utsläppet sker genom en trasig ventil invid tanken och på tankens undersida. Utsläppet sker alltså från vätskefasen. En del av den utsläppta vätskan ( $\approx 21\%$ ) flashar direkt vid utsläppet och resten samlas i en pöl på marken. Den totala utsläppshastigheten blir 1.17 kg/s.

Beräkningar har gjorts för tre olika vädersituationer. Resultaten ges som koncentrationen i ppm 500 m från utsläppet.

i. Stabilitetsklass D, vindhastighet 2 m/s och ytråheten  $z_0 = 0.3$  m

CHEMS	WHAZAN	SLAB	GREAT
64	41	50	48

ii. Stabilitetsklass D, vindhastighet 5 m/s och ytråheten  $z_0 = 0.3$  m

CHEMS	WHAZAN	SLAB	GREAT	CAMEO
28	21	25	25	41

iii. Stabilitetsklass F, vindhastighet 2 m/s och ytråheten  $z_0 = 0.3$  m

CHEMS	WHAZAN	SLAB	GREAT	CAMEO
332	61	270	67	494

## Exempel 4.

Här avses utsläpp av kondenserad naturgas (metan). Utsläpp avser bildandet av en pöl och därefter förångning av denna. Förångningshastigheten är 130 kg/s. Omgivningstemperaturen är 33.4°C och vindhastigheten 6.5 m/s. Stabilitetsklass C gäller. Avståndet till nedre brännbarhetsgränsen 5% har beräknats med tillgängliga datorprogram.

WHAZAN	SLAB	CHEMS	GREAT	CAMEO	Degadis
380 m	377 m	163 m	433 m	152 m	427 m

## Exempel 5.

Storskaliga utsläppsförsök med flytande propan genomfördes under 1985 och 1986 i nordvästra Tyskland [14,15]. Utsläppens storlek varierade från 2.5 kg/s till 61 kg/s. Vindhastigheterna var från 0.1 m/s till 5 m/s. Alla stabilitetsklasser finns representerade i försöksresultaten. Ett antal av dessa försök valdes ut och körningar med för dessa gällande situationer gjordes med tillgängliga datorprogram. Resultaten redovisas i tabell 11.2, där avståndet till nedre brännbarhetsgränsen (2.1%) för propan anges.

Kommentar: Som kan ses i tabell 11.2 ger olika program olika beräkningsresultat. Vid en viss utsläppssituation ger ett program bra överensstämmelse med experimentella resultat och vid en annan situation är något annat program bäst. Detta visar bara att det endast är beräkningsmodeller vi har till vårt förfogande. Några absoluta sanningar kan de inte ge utan endast en uppfattning om vad som kan ske vid ett utsläpp av en gasformig kemikalie.

I [16] redovisas en omfattande jämförelse mellan olika beräkningsprogram för gasspridning. Jämförelser görs för verkliga försök med utsläpp av gas. Av denna utvärdering kan man utläsa att skillnaderna mellan de olika modellernas resultat kan vara stora, en skillnad med en faktor två är inte ovanligt. För de redovisade jämförelserna ger CAMEO II sämst resultat vid jämförelse med experiment. I utvärderingen i [16] finns ytterligare några beräkningsprogram med som inte var tillgängliga vid de jämförelser som presenterats tidigare i avsnitt 11.

Tabell 11.2

Utsläpp [kg/s]	Varaktig- het [s]	Vindhast. [m/s]	Stabili- tetsklass	Experi- ment	CHEMS	HEAVY PUFF	WHAZAN SLAB	GREAT	CAMEO	
6	150	2.0	E	135	165	130	100	50	65	118
6	150	4.0	D	120–170	92	150	55	40	65	51
6	150	2.0	F	85–160	163	120	110	63	70	200
6	600	1.6	F	90–140	155	225	137	63	—	225
6	300	2.7	B	85–125	92	175	67	35	60	30
10	300	0.6	F	160–190	232	210	380	89	100	495

## NOMENKLATURLISTA

A	= utsläppsöppningens area [m <sup>2</sup> ]
A <sub>p</sub>	= pölens area [m <sup>2</sup> ]
A <sub>t</sub>	= behållarens mantelyta [m <sup>2</sup> ]
a	= tankens tvärsnittsyta [m <sup>2</sup> ]
B	= dimensionslöst masstransporttal
C	= koncentration [kg/m <sup>3</sup> ]
C <sub>d</sub>	= flödeskoefficient
C <sub>p</sub>	= specifikt värme vid konstant tryck [J/kgK]
C <sub>pl</sub>	= specifikt värme för vätskan, vid konstant tryck [J/kg K]
C <sub>p<sub>luft</sub></sub>	= specifikt värme för luft vid konstant tryck [J/g K]
C <sub>v</sub>	= specifikt värme vid konstant volym [J/kg K]
c	= koncentration [ppm]
D	= pöldiameter [m]
D <sub>eq</sub>	= pöldiameter vid jämvikt [m]
D <sub>max</sub>	= maximal diameter [m]
F <sub>p</sub>	= synfaktor för en punktkälla [m <sup>-2</sup> ]
F <sub>21</sub>	= synfaktor
f	= andel av utsläppet som flashar
g	= tyngdaccelerationen [m/s <sup>2</sup> ]
H	= höjd över utsläppspunkten [m]
H <sub>f</sub>	= flamhöjd [m]
H <sub>o</sub>	= ursprunglig vätskehöjd [m]
H <sub>BLEVE</sub>	= eldklotets centrumhöjd [m]
h	= konvektivt värmeövergångstal [W/m <sup>2</sup> K]
h <sub>luft</sub>	= värmeövergångstal för luft [W/m <sup>2</sup> K]
Δh <sub>c</sub>	= effektivt förbränningsvärme [MJ/kg]
kβ	= materialkonstanter för beräkning av förbränningshastighet [m <sup>-1</sup> ]
k <sub>luft</sub>	= konduktivitet för luft [W/m K]
L	= jetflammans längd [m]
L <sub>e</sub>	= kritisk längd [m]
L <sub>p</sub>	= rörets längd till öppningen [m]
M	= molekylvikt
M <sub>F</sub>	= molekylvikt för bränslet
M <sub>luft</sub>	= molekylvikt för luft
m	= total massa [kg]

$\dot{m}''$	= massförlusten vid brand i en vätskepöl [kg/m <sup>2</sup> s]
$\dot{m}_s$	= total förångningshastighet [g/s]
$\dot{m}''_s$	= massflöde från ytan [g/m <sup>2</sup> s]
$\dot{m}''_\infty$	= massförlusten vid brand i en pöl med oändlig diameter [kg/m <sup>2</sup> s]
Nu	= Nusselts tal, dimensionslöst
p	= lufttryck [mm Hg]
p <sub>F</sub>	= ångtryck för bränslet [mm Hg]
p <sub>w</sub>	= ångtryck för vatten [N/m <sup>2</sup> ]
Pr <sub>luft</sub>	= Prandtl's tal för luft, dimensionslöst
p <sub>a</sub>	= lufttrycket i omgivningen [N/m <sup>2</sup> ]
p <sub>s</sub>	= lagringstryck [N/m <sup>2</sup> ]
p <sub>vp</sub>	= ångtryck för vätskan vid lagringstemperatur [N/m <sup>2</sup> ]
Δp	= tryckskillnaden mellan lagringstryck och omgivningens tryck [N/m <sup>2</sup> ]
$\dot{q}$	= totalt avgiven effekt [kW]
$\dot{Q}_g$	= utflödeshastighet för gas [kg/s]
$\dot{Q}_l$	= massflöde av vätska från tank [kg/s]
$\dot{q}_r$	= emitterad effekt [kW]
$\dot{Q}_t$	= total utsläppshastighet [kg/s]
$\dot{q}''_x$	= strålning mottagen på avståndet x från källan [kW/m <sup>2</sup> ]
R*	= allmänna gaskonstanten [J/kmol K]
Re	= Reynolds tal, dimensionslöst
r	= pölens maximala radie [m]
r <sub>s,50</sub>	= riskavstånd [m]
T <sub>b</sub>	= kokpunkt vid atmosfärstryck [K]
T <sub>g</sub>	= gastemperatur i flamman [J]
T <sub>m</sub>	= markens ursprungstemperatur [K]
T <sub>s</sub>	= lagringstemperatur [K]
T <sub>o</sub>	= vätskans begynnelsestemperatur [K]
t	= tid [s]
t <sub>d</sub>	= förångningstid [s]
t <sub>BLEVE</sub>	= eldklotets varaktighet [s]
u	= vindhastighet [m/s]
u*	= dimensionslös vindhastighet
$\dot{V}$	= tillflöde av vätska [m <sup>3</sup> /s]



$V$	= tillförd mängd vätska [ $m^3$ ]
$W$	= jetflammans halva bredd vid flampetsen [ $m$ ]
$X$	= avstånd [ $m$ ]
$X_E$	= strålningsandel
$Y_{FR}$	= massfraktion bränsle i vätskepoolen
$Y_{FW}$	= massfraktion bränsle vid ytan i gasfasen
$Y_{F\infty}$	= massfraktion bränsle i luften ovanför bränsleytan
$\dot{y}$	= vätskans förbränningshastighet [ $m/s$ ]
$\Lambda$	= latent förångningsvärme [ $J/kg$ ]
$\rho_a$	= densitet för omgivande luft [ $kg/m^3$ ]
$\rho_g$	= gasens densitet vid lagringstryck [ $kg/m^3$ ]
$\rho_l$	= vätskans densitet [ $kg/m^3$ ]
$\rho_v$	= vätskans ångdensitet [ $kg/m^3$ ]
$\rho_w$	= densitet för vatten [ $kg/m^3$ ]
$\nu$	= kinematisk viskositet för luft [ $m^2/s$ ]
$\sigma_y, \sigma_z$	= dispersionskoefficienter [ $m$ ]
$\tau$	= korrektionsfaktor för luftens absorption av strålning
$\tau(\text{tank})$	= tidskonstant [ $s$ ]

## REFERENSER

### Generella referenser

- [1] Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York 1989
- [2] Workbook of Test Cases for Vapor Cloud Source Dispersion Models, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York 1989

### Specifika referenser

- [3] Lees, F P, Loss Prevention in the Process Industries, Vol 1, Butterworths, 1986, 427

- [4] Jensen, N O, On Cryogenic Liquid Pool Evaporation, *Journal of Hazardous Materials*, 3 (1983), 157-163
- [5] Kanury, A M, *Introduction to Combustion Phenomena*, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1975, 152-164
- [6] Hanna, S R and Drivas, P J, *Guidelines for use of Vapor Cloud Dispersion Models*, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, 1987, 27-32
- [7] Babrauskas, V, Estimating Large Pool Fire Burning Rates, *Fire Technology*, Nov 1983, 251-261
- [8] Merdan, K S and Croce, P A, Fire Hazard Calculations for Large Open Hydrocarbon Fires, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, NFPA, 1988, 2:45-2:87
- [9] Thomas, P H, The Size of Flames from Natural Fires, 9th Int. Combustion Symposium, Comb. Inst., Pittsburgh, PA, 1963, 844-859
- [10] *The Yellow Book, Methods for the Calculation of the Physical Effects of the Escape of Dangerous Material*, Report of the Committee for the Prevention of Disasters, the Directorate-General of Labour, Ministry of Social Affairs, The Netherlands, 1979
- [11] Holman, J P, *Heat Transfer*, MCGraw Hill, 1986, 133
- [12] Lees, F P, *Loss Prevention in the Process Industries*, Vol 1, Butterworths, 1986, 525
- [13] *Skydd mot fria gasmolnsexplosioner i processindustrin*, Ingenjörsvetenskapsakademin, Meddelande 238, Stockholm, 1981
- [14] Heinrich, M, Gerald, M and Wietfeldt, P, Large Scale Propane Release Experiments over Land at Different Atmospheric Stability Classes, *Journal of Hazardous Materials*, 20, 1988, 287-301

- [15] Heinrich, M, Gerhold, E and Wietfeldt, P, Corrigendum, Large Scale Propane Release Experiments over Land at Different Atmospheric Stability Classes, *Journal of Hazardous Materials*, 22, 1989, 407-413
- [16] Hanna, S R, Strimaitis, D G and Chang, J C, Evaluation of fourteen hazardous gas models with ammonia and hydrogen fluoride field data, *Journal of Hazardous Materials*, 26, 1991, 127-158



