

Sköndal 2:1

BILAGA B

KONSEKVENSBERÄKNINGAR

B.1 INLEDNING

I denna bilaga beräknas konsekvenserna av de olycksrisker (skadescenarier) som bedömts kunna påverka risknivån för ny bebyggelse inom planområdet Sköndal 2:1. Beräkningarna beaktar följande olycksrisker, vilka alla förknippas med den angränsandevägen:

- Scenario 2. Utsläpp och antändning av brännbar gas (klass 2.1)
 - 2.1. Utsläpp med direkt antändning (jetflamma)
 - 2.2. Utsläpp med fördröjd antändning (gasmolnsexplosion)
 - 2.3. Långvarig brandpåverkan på oskyddad gastank (BLEVE)
- Scenario 4. Utsläpp och antändning av brandfarlig vätska (klass 3)

Konsekvenserna för skadescenarierna beräknas alternativt bedöms med simuleringsprogram, handberäkningar samt litteraturstudier.

I denna riskanalys används riskmåttet *individrisk*. För att kunna sammanställa individrisker krävs konsekvensberäkningar som redovisar det avstånd från riskkällan inom vilket personer kan omkomma till följd av respektive olycksrisk.

Beräkningarna har delats in så att först redovisas beräkningarna avseende skadeavstånd och skadeområden för respektive olycksrisk (avsnitt B.2).

B.2 BERÄKNINGAR SKADEAVSTÅND/-OMRÅDEN

B.2.1 Klass 2.1. Brännbara gaser

För brännbara gaser kommer tre olika scenarier att studeras, som beror på typen av antändning:

- *Jetflamma*: omedelbar antändning av läckande gas under tryck
- *Gasmolnsexplosion*: fördröjd antändning av gas som hunnit spridas och därmed ej är under tryck
- *BLEVE*: Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion kan uppkomma om tank utan fungerande säkerhetsventil utsätts för en utbredd brand under en längre tid.

B.2.1.1 Indata

För ovanstående skadescenarier har utsläppssimuleringar gjorts med simuleringsprogrammet **Gasol** för att avgöra storleken på de områden inom vilka personer kan förväntas omkomma.

Utsläppssimuleringarna har utförts för tankbil (ca 25 ton gas). Det antas grovt att samtliga transporter innehåller tryckkondenserad gasol. I tabell B.5 redovisas den indata som anges i **Gasol** med avseende på tankutformning, väder etc.

Tabell B.1. Indata till Gasol för simulering av skadeområden vid jetflamma och gasmoln.

Faktor	Tankbil
Lagringstemperatur	15°C
Lagringstryck	7 bar övertryck vid 15°C
Tankdiameter	2,0 m
Tanklängd	18 m
Tankfyllnadsgrad	80 %
Tankens tomma vikt	50 000 kg
Designtryck	15 bar övertryck
Bristningstryck	4 x designtrycket
Luftryck	760 mmHg
Väder	15°C, 50 % relativ fuktighet, dag och klart
Omgivning	Många träd, häckar och enstaka hus (tätortsförhållanden)

Skadescenarierna jetflamma respektive gasmolnsexplosion har simulerats för följande utsläppsstorlekar /1/:

Tankbil

- Litet utsläpp: 0,09 kg/s
- Medelstort utsläpp: 0,9 kg/s
- Stort utsläpp: 17,8 kg/s

Skadeområdena för jetflamma och gasmolnsexplosion beror utöver utsläppsstorleken, även på om läckaget utgörs av gasfas, vätskefas eller i gasfas nära vätskeytan. I beräkningarna antas det konservativt att utsläppet sker nära vätskeytan då detta leder till de största skadeområdena.

Skadeområdena för gasmolnsexplosion är dessutom beroende av vindstyrkan, där skadeområdet blir större ju lägre vindstyrka. Även här antas det konservativt en relativt låg vindstyrka, ca 3 m/s.

B.2.1.2 Beräkningar och resultat

I tabell B.6 redovisas de avstånd, inom vilka personer antas omkomma, för respektive scenario vid olika typer av utsläpp. För jetflamma och brinnande gasmoln blir inte skadeområdet cirkulärt runt olycksplatsen utan mer plymformat, varför dess bredder även presenteras.

Skadeområdena som anges i tabell B.6 gäller en oskyddad person utomhus och anges i form av området där strålningen är så omfattande att det kan leda till 2:a respektive 3:e gradens brännskada. Cirka 15 % av de som får 2:a gradens brännskador antas få dödliga skador /2/. Det uppskattas grovt att motsvarande för de som får 3:e gradens brännskada är ca 50 %. För respektive scenario har även varaktigheten beräknats.

Tabell B.2. Beräknade skadeområden vid olika skadescenarier med utsläpp och antändning av brännbar gas vid transport i tankbil. Kolumnen Tid utgör för jetflamma dess varaktighet om utsläppet inte stoppas medan tid för gasmolnsexplosion (som betecknas med +) utgör den tid från att utsläppet stoppats som gasmolnet fortfarande kan antändas.

Skadescenario	Gasmolnsvolym	Skadeområde utomhus		Tid
		2:a gradens	3:e gradens	
Litet utsläpp (0,09 kg/s) – jetflamma	-	4,8 x 6 m	3,8 x 4 m	Ca 70 h
Litet utsläpp (0,09 kg/s) – gasmolnsexplosion	~ 0,0 m ³	~ 5 x 0 m	~ 5 x 0 m	+ 46 s
Medelstort utsläpp (0,9 kg/s) – jetflamma	-	13 x 14 m	12 x 10 m	Ca 7 h
Medelstort utsläpp (0,9 kg/s) – gasmolnsexpl.	210 m ³	70 x 50 m	70 x 50 m	+ 46 s
Stort utsläpp (17,8 kg/s) – jetflamma	-	56 x 60 m	49 x 44 m	Ca 20 min

/1/ Farligt gods – riskbedömning vid transport, Räddningsverket Karlstad, 1996

/2/ Vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och vätskor, andra reviderade och utökade upplagan, Försvarets Forskningsanstalt, September 1997

Stort utsläpp (17,8 kg/s) – gasmolnsexplosion	9190 m ³	185 x 215 m	175 x 215 m	+ 46 s
BLEVE	-	Radie 221 m	Radie 143 m	11 s

B.2.2 Klass 3. Brandfarlig vätska

För denna farligt godsklass utgörs skadescenarierna av att tanken skadas så allvarligt att vätska läcker ut och sedan antänds. Vid beräkning av konsekvensen av en farligt godsolycka med brandfarlig vätska antas tanken rymma bensin.

Beroende på utsläppstorleken antas olika stora pölar med brandfarlig vätska bildas vilket leder till olika mängder värmestrålning. Konsekvensberäkningar utförs för följande pölbrandsценарier:

- Liten pölbrand: 50 m²
- Medelstor pölbrand: 200 m²
- Stor pölbrand: 400 m²
- Tankbilsbrand Motsvarande stor pölbrand

B.2.2.1 Bedömningskriterier

Hur hög värmestrålning en person klarar utan att erhålla skador beror bl.a. på dess varaktighet. Detsamma gäller med avseende på hur hög strålning som krävs för att antända olika byggnadsmaterial. Ju längre strålningspåverkan, ju högre sannolikhet för skada.

I tabell B.9 redovisas exempel på strålningsnivåer och vilka skador dessa kan medföra avseende personskada respektive brandspridning. Det uppskattas att ca 15 % av de som får 2:a gradens brännskador kan omkomma /3/.

Tabell B.3. Effekter av olika strålningsnivåer /3, 4/.

Konsekvens	Strålningsintensitet [kW m ⁻²]
Ingen smärta vid långvarig bestrålning av bar hud	≤ 1
2:a gradens brännskada vid bestrålning under 1 minut	
- 100 % sannolikhet	19
- 50 % sannolikhet	7,5
Ingen smärta vid bestrålning av bar hud under 1 minut	< 2,5

/3/ Vådautsläpp av brandfarliga och giftiga gaser och vätskor, andra reviderade och utökade upplagan, Försvarets Forskningsanstalt, September 1997

/4/ Brandskyddshandboken, Rapport 3134, Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lund, 2005

2:a gradens brännskada vid bestrålning under 20 sekunder	
- 100 % sannolikhet	43
- 50 % sannolikhet	17
Outhärdlig smärta vid bestrålning av bar hud under 2 sekunder	20
Antändning av lättantändliga material, t.ex. gardiner	
med sticklåga	10
vid långvarig bestrålning	20
Antändning av obehandlat trä	
med sticklåga eller vid bestrålning under 5 minuter	15
vid långvarig bestrålning	30

En person som befinner sig utomhus och upptäcker en större brand försöker med stor sannolikhet sätta sig i säkerhet. Tiden för varseblivning samt beslut och reaktion innebär dock att personen kan utsättas för värmestrålning under en kortare stund innan han/hon reagerar. De strålningsnivåer och effekter som anges i tabell B.9 har i tabell B.10 omvandlats till en uppskattad andel omkomna beroende på strålningsnivå för personer som befinner sig utomhus.

Tabell B.4. Avstånd inom vilken strålningsnivån överstiger $X \text{ kW/m}^2$ vid pölbrand. Utomhus

Strålningsnivå	Andel omkomna
10 kW/m^2	1 %
40 kW/m^2	15 %
60 kW/m^2	50 %
80 kW/m^2	100 %

Sannolikheten för att personer som befinner sig inomhus omkommer bedöms utifrån den strålningsnivå som uppskattas vara kritisk med avseende på brandspridning in i byggnaden. Utifrån tabell B.9 så uppskattas den kritiska värmestrålningen vara 15 kW/m^2 om inga byggnadstekniska åtgärder beaktas. Dock bedöms det inte vara troligt att samtliga personer som befinner sig i en utsatt byggnad omkommer till följd av att en utvändigt brand sprids in i byggnaden. Mycket grovt uppskattas det att 10 % av de personer som befinner sig inomhus inom det område kring pölbranden där strålningsnivån överstiger 15 kW/m^2 omkommer.

B.2.2.2 Beräkningsmetodik

Strålningsberäkningarna har genomförts med hjälp av handberäkningar. Beräkningarna av den värmestrålning som det analyserade området utsätts för i händelse av olycka med påföljande brand genomförs utifrån följande moment:

- Beräkning av brandeffekt

- Beräkning av flammans höjd och temperatur
- Beräkning av synfaktor
- Beräkning av infallande strålning på olika avstånd från branden

Brandeffekten beräknas för att uppskatta hur mycket energi som avges från branden till omgivningen. Flammans höjd används för att beräkna den så kallade synfaktorn som anger hur mycket av den från branden emitterade strålningen som når olika punkter i omgivningen. Temperaturen hos flaman ligger till grund för beräkningen av hur mycket infallande strålning som mottas av ytor på olika avstånd från branden.

Brandeffekt

Brandeffekten erhålls genom följande samband /5/:

$$\text{Ekvation B.1.} \quad \dot{Q} = \chi \cdot \dot{m}'' \cdot \Delta H_c \cdot A_f \quad \text{där}$$

\dot{Q} = utvecklad effekt (kW)

χ = förbränningseffektivitet (i de flesta används värdet 0,7 /5/)

\dot{m}'' = förbränningshastighet per ytenhet (kg/m²s)

ΔH_c = förbränningsvärme (MJ/kg)

A_f = brinnande yta (m²)

Ekvationen gäller förutsatt att pölbrandens diameter är relativt stor (>2 m). För bensin gäller följande /5/:

$$\dot{m}'' = 0,055 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$\Delta H_c = 43,7 \text{ MJ/kg}$$

Flamhöjd

Flamhöjden H_f (m) beräknas med följande ekvation /5/:

$$\text{Ekvation B.2.} \quad H_f = 0.23 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1,02D \quad \text{där}$$

D = pöldiameter

Flamtemperatur

/5/ Enclosure Fire Dynamics, Karlsson & Quintiere, 2000

Flamtemperaturen T_f utgör medeltemperaturen i flammen. Temperaturen i flamspetsen är ca 540°C (813 K) /6/. Vid lägre temperaturer förlorar flammen sin laminära karaktär. Om flammans maximala temperatur bestäms till 1000°C (1273 K) /7/ kan medeltemperaturen i flammen bestämmas. Den maximala flamtemperaturen är bland annat beroende av vilket material som brinner och storleken på branden. Medeltemperaturen används i beräkningen av strålningen från flammen och erhålls enligt:

$$\text{Ekvation B.3.} \quad T_f = \left(\frac{1273^4 + 813^4}{2} \right)^{1/4} = 1112 \text{ K}$$

Synfaktor

Synfaktorn F anger hur stor andel av den emitterade strålningen som når en mottagande punkt eller yta (se figur B.1).

Vid beräkningen av synfaktorn antas att branden är rektangulär så att flammans diameter är lika stor i toppen som i botten. Detta är ett konservativt antagande då branden i själva verket normalt smalnar av väsentligt upptill.

Synfaktorn $F_{1,2}$ mellan flammen och den mottagande punkten är en geometrisk konstruktion som beräknas enligt /7/:

$$\text{Ekvation B.4.} \quad F_{1,2} = F_{A1,2} + F_{B1,2} + F_{C1,2} + F_{D1,2}$$

där $F_{A1,2}$, $F_{B1,2}$, $F_{C1,2}$ och $F_{D1,2}$ beräknas enligt följande:

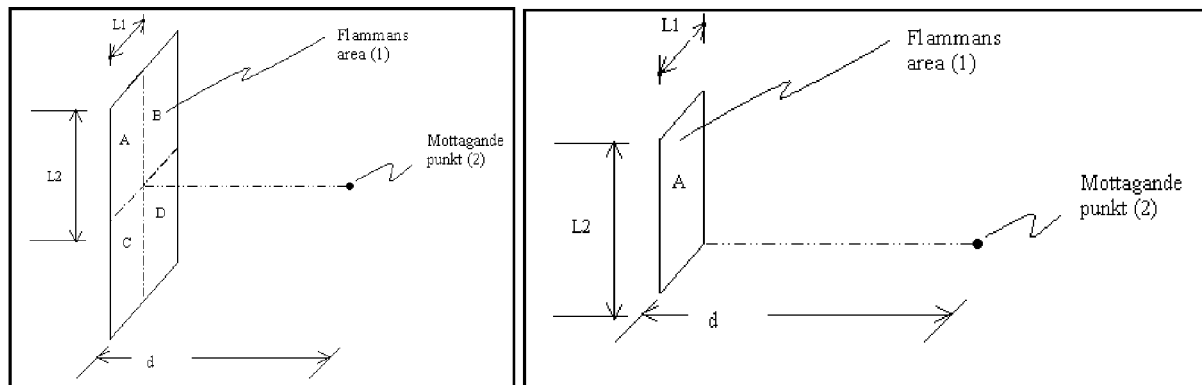
$$\text{Ekvation B.5.} \quad F_{A1,2} = \int_0^{A_1} \frac{\cos \Theta_1 \cos \Theta_2}{\pi d^2} \cdot dA_1 \quad \text{där}$$

$\Theta_1 = \Theta_2 =$ infallande vinkel (d.v.s. 0)

$A_1 = L_1 \cdot L_2$ enligt figur B.1.

/6/ Fire safety of bare external structural steel, Law & O'Brien, Constrado, 1981

/7/ An Introduction to Fire Dynamics – second edition, Drysdale, University of Edinburgh, UK 1999



Figur B.1. Synfaktor.

Ekvation B.7 kan omvandlas till följande ekvation för beräkning av respektive ytas (A, B, C och D) synfaktor /8/:

Ekvation B.6.
$$F_{A12} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \text{ där}$$

$X = \frac{L_1}{d}$ och $Y = \frac{L_2}{d}$ enligt figur B.4.

Om ytorna A, B, C och D är lika stora betyder det att den mest kritiska punkten på avståndet d från branden studeras. Genom att dela upp brandens totala area i olika stora ytor kan synfaktorn och då värmestrålningen bestämmas för en punkt på avståndet d från branden på X meters höjd. Detta kan vara lämpligt när man studerar exempelvis avstånd till kritisk värmestrålning för människor utomhus eftersom det då är aktuellt med en höjd på 1,5-2 meter. Synfaktorn mellan flammen och en punkt kan även tas fram med hjälp av tabellvärden.

Infallande strålning

Den från branden infallande värmestrålningen som når omgivningen varierar med flammans temperatur, synfaktorn och den brinnande massans emissivitet. Emissiviteten, det vill säga materialets förmåga att avge värmeenergi, är beroende av materialets temperatur och egenskaper, särskilt vid ytan. Exempelvis kan sägas att en blankpolerad yta har mycket lägre emissivitet än en mörk skrovlig yta. Den infallande strålningen beräknas genom:

Ekvation B.7.
$$q_r'' = \varepsilon \sigma F T_f^4 \quad \text{där}$$

q_r'' = Infallande strålning (kW/m²)

ε = Emissionstal

σ = Stefan-Boltzmanns konstant (= 5.67×10^{-11} kW/m²K⁴)

/8/

Thermal Radiation Heat Transfer, 3rd ed., Seigel & Howell, USA 1992

F = Synfaktor

T_f = Flammans medeltemperatur

Emissionstalet för en flamma varierar med materialets egenskaper och tjockleken på flaman. För stora bränder antas emissionstalet vara 1, vilket är ett konservativt antagande.

B.2.2.3 Beräkningar och resultat

Med hjälp av ovanstående samband och förutsättningar har brandeffekten, brandens diameter och flammhöjden för de olika pölbrandscenarierna (se tabell B.5).

Tabell B.5. Tabell med beräknade värden på effektutveckling, brandens diameter och flammhöjd.

Scenario	Brinnande yta (m ²)	Utvecklad effekt (kW)	Brandens diameter D_f (m)	Flammhöjd H_f (m)
Liten pölbrand	50	84 123	8,0	13,3
Medelstor pölbrand	200	336 490	16,0	21,1
Stor pölbrand / Tankbilsbrand	400	672 980	22,6	26,3

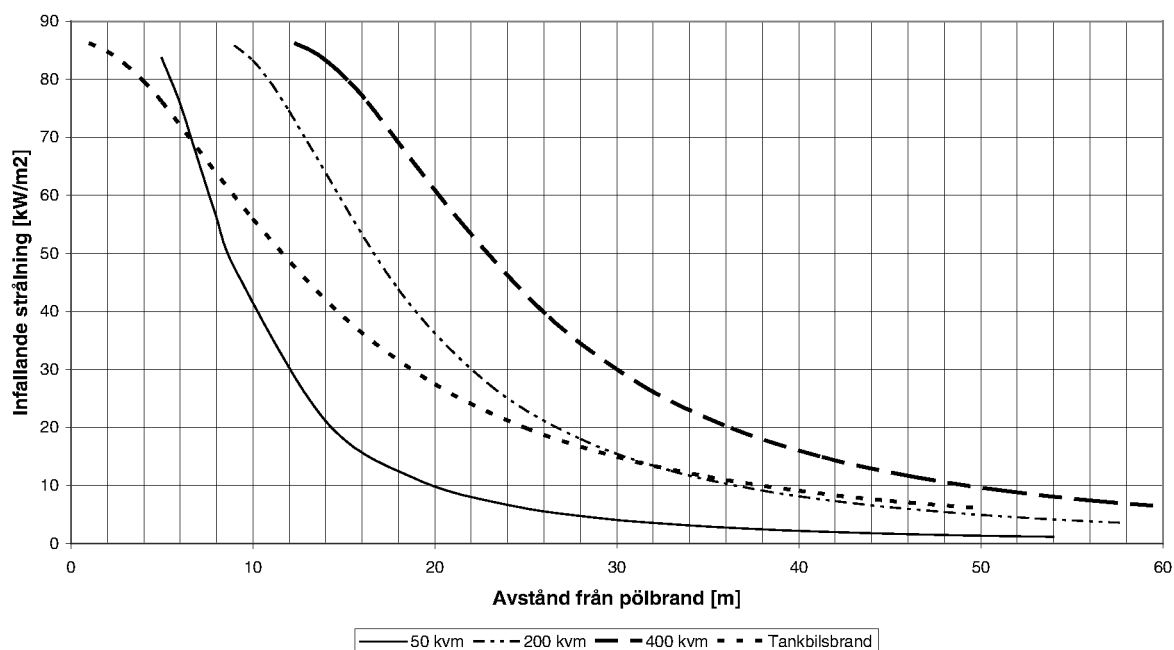
Beräkningarna av den infallande strålningen redovisas i tabell B.6 nedan. Strålningen har beräknats på halva flammans höjd.

Tabell B.6. Beräkning av strålning och synfaktor på halva flammans höjd för olika avstånd från pölbranden.

Avstånd (m)	50 m ²		100 m ²		200 m ²		400 m ²	
	$F_{1,2}$	q_r''	$F_{1,2}$	q_r''	$F_{1,2}$	q_r''	$F_{1,2}$	q_r''
5	0.55	47.45	0.69	59.51	0.80	69.28	0.88	76.10
10	0.24	21.14	0.36	31.62	0.51	43.84	0.65	55.95
15	0.13	11.09	0.21	17.94	0.32	27.43	0.45	39.00
20	0.08	6.67	0.13	11.20	0.21	18.05	0.32	27.46
25	0.05	4.41	0.09	7.56	0.14	12.55	0.23	19.91
30	0.04	3.12	0.06	5.41	0.11	9.15	0.17	14.91
35	0.03	2.32	0.05	4.05	0.08	6.93	0.13	11.50
40	0.02	1.79	0.04	3.14	0.06	5.41	0.10	9.10
45	0.02	1.42	0.03	2.50	0.05	4.34	0.08	7.36
50	0.01	1.16	0.02	2.04	0.04	3.55	0.07	6.07

I figur B.2 redovisas den infallande strålningen som funktion av avståndet från pölbranden. I figuren beaktas även pölens radie, vilket ej beaktas i de avstånd som anges i tabell B.10 som utgår från flammans kant.

Infallande värmestrålning mot bebyggelse



Figur B.2. . Infallande strålning som funktion av avståndet från pölbrand inkl. pölradie

Utifrån ovanstående beräkningar och de kriterier som anges i avsnitt B.2.4.1 redovisas skadeområdena för respektive brandscenario i tabell B.13 nedan.

Tabell B.7. Sammanställning av skadeområden för kritiska strålningsnivåer vid pölbrand.

Strålningsnivå	Avstånd från brand					Konsekvens
	50 kvm	100 kvm	200 kvm	400 kvm	Tankbil	
10 kW/m ²	20 m	27 m	36 m	49 m	36 m	1 % antas omkomna utomhus
60 kW/m ²	8 m	10 m	15 m	20 m	9 m	50 % antas omkomma utomhus
80 kW/m ²	5 m	8 m	11 m	15 m	4 m	100 % antas omkomma utomhus
15 kW/m ²	16 m	22 m	30 m	41 m	30 m	10 % antas omkomma inomhus