

# REKOMMENDATION FÖR BEGRÄNSNING AV BRANDSPRIDNING MELLAN DEPÅCISTERNER

UTGÅVA 2, 2021



# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>1. Inledning</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Definitioner och förkortningar</b> .....	<b>5</b>
<b>3. Krav enligt lagstiftningen</b> .....	<b>6</b>
<b>4. Avgränsningar</b> .....	<b>7</b>
5.1 Beskrivning av depåverksamhet .....	8
<b>5. Depå för brandfarlig vätska – Utförande och layout</b> .....	<b>8</b>
6.1 Orsaker till brand i depåcistern .....	10
<b>6. Brandteori och introduktion av beräkningsfall</b> .....	<b>10</b>
6.2 Orsaker till brand i invallning .....	11
6.3 Orsaker till brandspridning mellan cisterner samt från invallning till cisterner .....	11
6.4 Antändning mot het yta .....	11
6.5 Osäkerhetsfaktorer som påverkar sannolikheten för antändning .....	12
6.6 Spridningsförlopp i modellen .....	14
6.6.1 Fall 1 – Brand i invallning som påverkar cistern inom invallning .....	14
6.6.2 Fall 2 – Invallningsbrand med värmepåverkan på cistern utanför invallningen. ....	15
6.6.3 Fall 3 – Brand i cistern med värmepåverkan på annan cistern. ....	15
6.7 Modellförutsättningar i Drivkraft Sveriges beräkningsprogram .....	15
6.7.1 Uppvärmning av cisternmantel .....	16
6.7.2 Invallningsbrand .....	16



<b>7. Arbetsgång för beräkningar i beräkningsverktyget .....</b>	<b>17</b>
7.1 Generella användarinstruktioner .....	17
7.2 Beräkningsexempel Fall 1, Invallningsbrand som ger direktpåverkan av flammor på hotad cistern inom invallning.....	18
7.3 Beräkningsexempel Fall 2, Invallningsbrand med värmepåverkan på hotad cistern utanför invallningen.....	19
7.4 Beräkningsexempel Fall 3, Brand i cistern med värmepåvekan på hotad cistern.....	20
<b>8. Bedömning av beräkningsresultat.....</b>	<b>22</b>
8.1 Beräkning och resultat.....	22
<b>9. Åtgärder – planering och överväganden .....</b>	<b>26</b>
9.1 Åtgärdsplanering om skyddsbehov av cisterner har identifierats.....	26
9.2 Tekniska grundprinciper för att skydda cisterner mot värmestrålning.....	27
9.2.1 Passiva skadebegränsande åtgärder .....	27
9.2.2 Aktiva skadebegränsande åtgärder – Kylning av cisterner.....	29
9.3 Kylplaner – Exempel .....	30
<b>10.Referenser.....</b>	<b>33</b>
<b>Bilaga 1.....</b>	<b>35</b>
<b>Bilaga 2.....</b>	<b>51</b>

---

Rekommendationerna är fastställda av Drivkraft Sveriges styrelse 2021.

Drivkraft Sverige har lagt ned mycket arbete på att informationen i denna publikation skall vara korrekt. Drivkraft Sverige kan dock inte hållas ansvariga om nyttjandet av informationen lett till skada av vad slag den vara må.



# 1 INLEDNING

Denna Drivkraft Sverige (tidigare SPBI) rekommendation är en vägledning om förhållanden som påverkar brandspridning och de åtgärder som kan behövas i en depåverksamhet för att undvika brandspridning vid en cisternbrand. Rekommendationen, tillsammans med kompletterande beräkningsverktyg, täcker även de särskilda behov som föreligger om etanol lagras tillsammans med andra produkter. Denna rekommendation har även beaktat ny kunskap om etanolens brinnegenskaper.

Syftet med rekommendationen är ge kunskapsunderlag och rekommendationer för att biträda en verksamhetsutövare att bedöma om risk finns för brandspridning mellan depåcisterner eller i invallning i händelse av en brand. Det avser frågeställningar rörande cisternbrand, samt hur värmepåverkan från brinnande produkter i cisterner och invallningar kan påverka närliggande cisterner och därmed behovet av skyddsbarriärer. Rekommendationen syftar även till att vara en användarvägledning för beräkningsprogrammet som Drivkraft Sverige utvecklat.

Målsättningen med denna rekommendation tillsammans med Drivkraft Sveriges beräkningsprogram, är att identifiera behov av skyddsbarriärer och att ge verksamhetsutövare ett bedömningsunderlag för att skapa barriärer för att förhindra brandspridning. Om risk finns för brandspridning kan depåägaren behöva analysera dessa mer i detalj på en depå, och ytterligare barriärer kan behövas.

Rekommendationen har skapats bl.a. mot bakgrund av att Räddningstjänsterna ställer olika krav på kylanordningar för cisterner för depåer i olika delar av landet. Ett enhetligt synsätt för alla depåer i landet bedöms därför som viktigt för att få ett bättre underlag för bedömning av risker och val av barriärer och kostnads-effektiva lösningar.

Denna Drivkraft Sverige rekommendation behandlar enbart förhållandena på en depå eller energihamn-område, se avgränsning kap 4.

Drivkraft Sverige rekommendationen är tänkt att komplettera befintliga dokument från tidigare Räddningsverket m.fl. institutioner/Ref. 1, 2, 3 och 5/

samt, rapporter och publikationer som rör kylning av cisterner på depåer.

Drivkraft Sverige vill understryka att användning med beräkning av ej verifierade produktdata eller vetenskapligt underbyggda beräkningsvariabler, får ske helt under användarens eget ansvar.

I denna version som uppdaterats mars 2021 har kriteriet för risk för brandspridning ändrats från termisk tändpunkt till temperaturen för antändning mot het yta på en cistern exponerad för värmestrålning från en intilliggande brand.

Metoden för beräkning av temperaturen på den exponerade cisternen har också ändrats, till att numera inkludera utstrålad värme från den heta cisternväggen i värmebalansen.

En annan ändring i denna version är att beräkningen av tid till kokpunkt och tid till att brännbar atmosfär uppstår i den exponerade cisternen har utgått. Dessa tider är avhängiga av fyllnadsgrad och det råder dessutom inte konsensus om på vilket sätt de kan användas för att bedöma risken för brandspridning.

Mot bakgrund av att Rekommendationen är en vägledning ska användaren naturligtvis också beakta annan information och omständigheter vid dennes bedömningar av de åtgärder som behöver vidtas eller beaktas. Vid minsta tveak bör användaren anlita expertkunskap.

Drivkraft Sverige tar inget ansvar för användandet av Rekommendationen eller beräkningsverktyget. All användning och beslut baserade på detta material sker därför på egen risk.

# 2 DEFINITIONER OCH FÖRKORTNINGAR

Följande definitioner och förkortningar används i publikationen:

- **AHT**, Antändning mot het yta. Den temperatur då en brännbar atmosfär antänds vid delvis kontakt med en het yta. Ej att förväxla med termisk tändpunkt som bestäms genom att omsluta hela den brännbara atmosfären med het yta. Observera att AHT ej kan användas för bestämning av temperaturklasser och val av utrustning utifrån EU-direktiven 2014/34/EU och 1999/92/EG (ATEX).
- **Barriär**: Ett begrepp som beskriver skydds- eller säkerhetsfunktioner. Vanligen förekommer begreppet inom riskanalyser eller i övriga säkerhetsrelaterade dokument och redovisningar.

Olika typer av barriärer har använts i litteraturen; typiska barriärer kan kategoriseras som Fysiska, Funktionella, Symboliska och Immateriella.

- **Fysiska**: t.ex. fysiskt hinder som styr bort eller hindrar vätskeflöde. Det kan även inom säkerhetsterminologi vara branddörrar, skyddsgrindar, ingreppsskydd m.m.
- **Funktionella barriärer**: Brandlarm, automatstängande branddörrar, säkerhetsventiler, nivå- eller trip-larm, ESD-funktioner (Emergency Shut Down) m.m.
- **Symboliska barriärer**: Skyltning, varningssignaler, varselmärkning, m.m.
- **Immateriella barriärer**: Säkerhetsrutiner, instruktioner, kompetens och utbildning, övningar, beredskapsläge m.m.
- **CLP**, Classification, Labeling and Packaging (EG nr 1272/2008 om klassificering och förpackning av kemiska ämnen och blandningar). En EU-förordning gällande klassificering, märkning och förpackning av kemiska ämnen och blandningar. Rena ämnen omfattas fr.o.m. december 2010, medan blandningar omfattas av regelverket fr.o.m. 1 juni 2015.

- **E97**: Etanol med inblandning av bensen använd för brandprov.
- **Flampunkt**: Ett ämnes flampunkt är den lägsta temperatur vid vilken det avger så mycket brännbara gaser att det kan antändas.
- **FAME** (Fatty Acid Methyl Esther). En bio-produkt som kan användas som tillsats i diesel eller som egen produkt.
- **HVO** (Hydrogenated Vegetable Oils). En bio-produkt som kan användas som tillsats i diesel eller som egen produkt.
- **Invallning**: Ett fysiskt hinder runt förvaringsplats som skall hindra uttrinnade brandfarlig vätska att spridas okontrollerat (ref. SÅIFS 2000:2, Hantering av brandfarliga vätskor- Sprängämnesinspektionens föreskrifter om brandfarliga vätskor med ändringar i SÅIFS 2000:5).
- **Kylvatten**: Allt vatten som används för kylning men som inte är påverkat av branden, det vill säga inte innehåller förbränningsprodukter eller kemiska substanser från släckmedlet.
- **MSB**, Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap (tidigare SRV, Statens räddningsverk)
- **Primärt skydd**: Primärt skydd mot utsläpp av produkt är t.ex. Cisternvägg /behållare
- **Termisk tändtemperatur**, självantändningstemperatur. Den temperatur där en brandfarlig vätska/ ånga kan antändas enbart p.g.a. kontakt med het yta, d.v.s. utan närvaro av gnista eller öppen eld. På engelska kallas denna temperatur för Auto Ignition Temperature (AIT).
- **Vätskeyta**: Arean av produkten som brinner.

# 3

## KRAV ENLIGT LAGSTIFTNINGEN

Nedan listas några av de lagar, förordningar och föreskrifter som är tillämpliga i samband med brand och kylning på depå.

- Miljöbalken (SFS 1998:808)
- Förordningen om verksamhetsutövarens egenkontroll (SFS 1998:901)
- Förordning (SFS 1998:899) om miljöfarlig verksamhet och hälsoskydd
- NV:s Författningssamling, NVFS
  - NFS 2003:24 Föreskrifter mot mark- och vattenförening vid lagring av brandfarliga vätskor.  
**NB:** denna föreskrift kan komma att dras in då MSB reglerar tekniska krav för cisterner med brandfarliga varor i sina föreskrifter.
- Arbetsmiljölagen (SFS 1977:1160)
- Den s.k. Sevesolagstiftningen (innefattande ett flertal lagar, förordningar och föreskrifter från olika myndigheter).
  - Förordning (SFS 2015:236) om åtgärder för att förebygga och begränsa följderna av allvarliga kemikalieolyckor. Denna ersätter tidigare förordning (SFS 1999:382) med samma namn.
  - Lag (2015:233) om ändring i Lagen (SFS 1999:381) om åtgärder för att förebygga och begränsa följderna av allvarliga kemikalieolyckor
  - MSBFS 2015:8, Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSBs föreskrifter om åtgärder för att förebygga och begränsa följderna av allvarliga kemikalieolyckor
- Lagen om skydd mot olyckor (SFS 2003:778, (2 kap. §4 m.fl.))
- Lag (2015:234) om ändring i Lagen om Skydd mot Olyckor (SFS 2003 2003:778)
- Förordningen (2015:239) om ändring i förordningen (2003:789) om skydd mot olyckor
- Förordningen (2015:238) om ändring i miljötillsynsförordningen (2011:13)
- Lagen (2015:232) om ändring i miljöbalken (1998:808)
- Förordningen (2015:237) om ändring i förordningen (1998:899) om miljöfarlig verksamhet och hälsoskydd
- Lagen (2015:235) om ändring i plan- och bygglagen (2010:900)
- Lag (SFS 2010:1011) om brandfarliga och explosiva varor
- Förordningen (SFS 2010:1075) om brandfarliga och explosiva varor
- SÄIFS 2000:2 Statens Räddningsverks föreskrifter och allmänna råd om hantering av brandfarliga vätskor

# 4 AVGRÄNSNINGAR

Följande avgränsningar har gjorts i Drivkraft Sverige Rekommendation för begränsning av brandspridning mellan depåcisterner.

Nedanstående lista illustrerar de områden och avgränsningar som valts för beräkning av kraftig uppvärmning och i förlängningen risken för brandspridning till närliggande cisterner vid brand på depå.

Denna publikation behandlar ej:

- Brand i tankbåt vid kaj,
- Farligt Gods transporter på land inkl. järnvägstransporter,
- Bergrum
- Fordonsutlastning
- Sannolikhetsberäkning för möjliga situationer
- Konsekvensutredning av olika händelser

Denna publikation behandlar kylning och lagring av i huvudsak följande produkter:

- Petroleumprodukter, (bensin, diesel, råolja, EO 1-5)
- Biodrivmedel
- Etanolprodukter för drivmedel (E85, ED95) och metanol
- Alkylatbensin

Beskrivningarna avser endast brand i cisterner ovan jord och i invallningar på en depå.

Drivkraft Sveriges beräkningsprogram belyser förutsättningar för brandspridning endast på depå.

Ev. explosionsrisker, samt sannolikheterna för dessa och ev. följder går ej att bedöma med hjälp av Drivkraft Sveriges beräkningsprogram.

Vattenkylning av cistern beräknas med antagandet om 75 % nyttjandegrad av tillfört vatten. Denna andel kan vara lägre (t.ex. mobilt kylsystem och sidovind) eller högre (fast kylsystem utan vindpåverkan). Beskrivningarna avser depåer med meteorologiska och klimatförhållanden som råder i Sverige.

# 5 DEPÅ FÖR BRANDFARLIG VÄTSKA – UTFÖRANDE OCH LAYOUT

## 5.1 Beskrivning av depåverksamhet

Nedanstående bilder visar exempel på depåer för brandfarlig vätska som är uppbyggda av cisterner innehållande olika produkter fördelade på ett antal områden, avgränsade av brandgator. På depån finns även utlastningsplatser, rörledningar med pumpstationer. Drivmedelsbolagen i Sverige lastar ut majoriteten av depåernas produkter på tankbil, men det sker även en viss utlastning till fartyg och järnväg. Import sker vanligen med fartyg, men det sker även införsel med bil och järnväg eller via ledningar

från raffinaderier eller annan depå. Cisterner inom depån kan vara uppställda på ett eller flera av nedanstående sätt:

- Enskild cistern inom invallning (Bild 1)
- Flera cisterner inom invallning (Bild 2)
- Flera cisterner inom invallning med cisternspecifik avgränsning, s.k. "kvartersinvallning" (Bild 3)
- Icke invallade cisterner (Bild 4)

Cisterner kan ha olika utformning på skyddet mot värmepåverkan, t.ex. värmeisolering och/eller fast kylinstallation.



Källa: Hans Mårtensson, SH

Bild 1. Enskild cistern inom invallning.





Källa: Hans Martensson, St1

Bild 2. Flera cisterner inom invalning.



Källa: Hans Martensson, St1

Bild 3. Flera cisterner inom invalning med cisternspecifik avgränsning, s.k. "kvartersinvalning".



Källa: Inter Terminals

Bild 4. Icke invallade cisterner.

# 6

## BRANDTEORI OCH INTRODUKTION AV BERÄKNINGSFALL

### 6.1 Orsaker till brand i depåcistern

Det finns flera händelsekedjor som kan leda till brand på en oljedepå. I respektive oljedepås riskanalys ska riskerna vara kända och utredda för att kunna hanteras på ett korrekt sätt. Det finns enligt gällande lagstiftning om brandfarliga och explosiva varor tydligt utställda riskutredningskrav, aktsamhetskrav och kompetenskrav.

Av de inträffade depåcisternbränder som inträffat runt om i världen är blixtnedslag dominerande som brandorsak (ca 33 %). Ytterligare brandorsaker där brand i depåverksamhet uppstått enligt sammanställda undersökningar/Ref. 10/ är t.ex. läckage, statisk elektricitet, läckage i ledningar, underhållsåtgärder med bristande rutiner m.fl. grunder. Sannolikheten för fullt utvecklad brand i depåcistern är beräknad till  $3 \times 10^{-5}$ /år ( motsvarar 1 gång på 33 000 år). (Ref. 12).

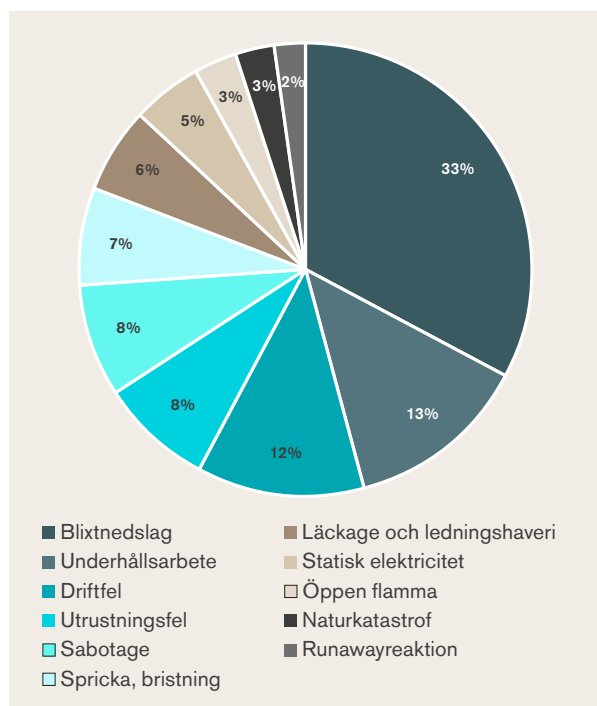


Bild 5. Fördelning av tändorsaker till fullt utvecklade cisternbränder/ref. 10/.

Vilken sannolikhet för antändning av depåcistern som är gällande på befintliga depåer inom Sverige kan skilja beroende på det förebyggande och riskminimerande arbete som pågår på depån. Nedan beskrivs kort de åtgärder som införts generellt inom oljeindustrin för att minska risken för antändning i depåcisterner:

- I Sverige finns krav på åskskydd av cisterner över 500 m<sup>3</sup> vilket ger ett bra skydd mot antändning. Frekvensen för blixtnedslag är i Sverige låg i jämförelse med de regioner i världen med mer extrema väderförhållanden råder, t.ex. i områden med tropiskt eller subtropiskt klimat.
- Hetarbeten för underhållsarbeten är styrda genom strikta arbetstillståndssystem som bl.a. innefattar riskanalys, urdrifttagning och gasfrihetsförklaring.
- Jordning av produktsystem.
- Rutiner för maximal pumphastighet samt relaxations-tid innan hantering efter pumpning.
- Utrustning i område med explosiv atmosfär har ett utförande med godkännande enligt ATEX regelverk.
- Återkommande kontroll av elektrisk utrustning.
- Återkommande besiktning av cisterner och rörledning (lagstadgat).
- Inhägnade depåer där obehörig ej har tillträde.
- Generellt förbud mot öppen flamma inom depåområden utan att arbetstillstånd utfärdats.
- Inhibering av polymeriserande produkter tillsammans med andra reaktionshämmande åtgärder.

Det finns ett flertal publicerade utredningar och forskningsrapporter från olika tidpunkter om cisternbränder, tändorsaker och annat av speciellt intresse för ämnet cisternbränder. Enligt Dr Khalid Mansour (Ref. 11) är andelen bränder där tändorsaken varit värmeöverföring genom värmestrålning från brand mellan 2-5 % (hälften av ca 5-10 %, proportionellt 1:50 respektive 1:20) av alla inrapporterade antändningsorsaker för petroleumprodukter. Det innebär att frekvensen för cisternbrand genom *enbart*

*värmeöverföring* statistiskt kan vara ändå lägre, i storleksordningen  $1,5 \times 10^{-6}$ /år (motsvarar ca 1 gång per 667 000 år). I Sverige inträffade en cisternbrand senast 1956, men då p.g.a. cisternspricka och efterföljande läckage. Endast en (1) cisternbrand har rapporterats inom petroleumindustrin i en omfattande internationell kartläggning, där brand uppstått genom direkt yttre värmepåverkan. Vid det tillfället handlade det om en naftacistern i Singapore där omgivningstemperaturen (27°C) låg nära vätskans begynnelsekokpunkt (36°C), vilket enligt Dr Mansour är en omständighet som kan öka påverkan för tändning och därmed risken för brandspridning.

## 6.2 Orsaker till brand i invallning

Läckage kan uppstå av olika orsaker som sedan ger upphov till ångmoln som driver i vinden. Sådana ångmoln kan i vissa fall spridas även utanför de områden som har klassad (inkapslad) elutrustning och kan komma i kontakt med tändkällor exempelvis längs en intern väg, en parkering eller en plats där arbete bedrivs som ger upphov till tändkällor. Branden kan sedan spridas tillbaka till invallningen.

En annan källa till antändning kan vara statisk elektricitet som kan uppkomma vid läckage då produkten laddas upp vid t.ex. fritt fall.

Produkter med flampunkter över +30°C, bildar sällan antändbara ångmoln vid utsläpp i sådana temperaturförhållanden som gäller i Sverige. Därför är antändningsrisken betydligt mindre hos dessa produkter.

Cisterner för produkter med flampunkt under +30°C, har vanligen invallningar som minskar konsekvensen av eventuella överspolningar, ventilläckage och läckage från flänsar eller cisternmantel. Av dessa skäl har vi i denna rekommendation valt att utgå ifrån att antändning uppstår efter ett spill i en invallning som sedan leder till en invallningsbrand efter att spillet antänts. Invallningsbranden kan komma att sprida sig till cisternen som står i den eller till närliggande cisterner.

## 6.3 Orsaker till brandspridning mellan cisterner samt från invallning till cisterner

Brandprov genomförda av SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut /ref. 4/, har visat att en relativt sett högre andel värmeeffekt på nära avstånd avges vid etanolbrand med en större brinnytta i jämförelse med en motsvarande brinnytta för bensen. Denna skillnad i värmeavgivning per ytenhet kan på kortare avstånd i sin tur påverka ytterligare barriärer på en cistern, och risken för eskalering av brand på en depå genom snabb uppvärmning av mantelytan på intilliggande cisterner.

Brandspridning till en intilliggande cistern kan ske om brännbara ångor från vätskan i den intilliggande cisternen kommer i kontakt med en tändkälla orsakad av branden. Tändkällor vid brandspridning kan vara den heta ytan på cisternväggen som vetter mot branden eller heta partiklar i

brandrök och flamma som kommer i kontakt med brännbara ångor som strömmar ut ur den hotade cisterns ventilationsöppningar då dess innehåll värms. Utgångspunkten i denna skrift och beräkningsprogrammet är att brandspridning kan ske genom antändning mot het yta i hotad cistern. Detta bedöms konservativt och mer definierbart jämfört med scenariot att antändning sker i de utströmmande gaserna utanför cisternen.

Flampunkten på produkten i den hotade cisternen spelar inte någon avgörande roll för antändningsrisken, eftersom tankväggen på en hotad cistern snabbt kan nå över 100°C och skapa brännbar atmosfär ovanför de flesta brännbara vätskor. Hela bulken av brandfarliga vätska behöver inte bli uppvärmd, utan det räcker att yttemperaturen når flampunkten. Eftersom het vätska har lägre densitet än kall är det sannolikt att yttemperaturen på vätskan i den hotade cisternen kan nå flampunkten jämförelsevis snabbt trots att bulken av vätska fortfarande är kall.

Dimensionerande för tid till antändning i denna skrift och beräkningsprogrammet är tiden tills tankväggen på hotad cistern når temperaturen för antändning mot het yta (AHT).

## 6.4 Antändning mot het yta

Självantändning av brännbara vätskor bestäms i tester där vätskan i sin helhet är omsluten av samma temperatur. Vid antändning mot en het cisternvägg är vätskan och dess ångor enbart delvis exponerad mot en yta med hög temperatur. Det har visats att antändning mot heta ytor beroende på geometrin kan skilja sig mot självantändningstemperaturen (termisk tändpunkt), vilket har studerats av RISE (Emil Hallberg et al, 2019, ref 16). Utifrån litteraturstudier och de tester som genomförts vid RISE rekommenderas dimensionerande temperaturer (AHT) för specifika produkter i Tabell 1 för bedömning av risken för antändning mot het yta inuti en hotad cistern. För andra produkter kan termisk tändpunkt användas som en konservativ approximation. En utförlig motivering till dess värden finns redovisad i Appendix Bilaga 2. I sammanhanget är det viktigt att notera att AHT inte ska kopplas till de temperaturklasser som används för klassificering av explosiv atmosfär och Ex-utrustningar i ATEX-sammanhang. AHT i denna rapport är enbart en storhet som används för att bedöma risken för brandspridning mellan cisterner till följd av värmestrålning.

Tabell 1 Rekommenderade värden för AHT

Bränsle	Rekommenderad AHT (°C)
Diesel	270
Eldningsolja EO 1	270
Jet A-1	270
Bensen	330
Etanol	400
RME <sup>1)</sup>	270
E85	400
HVO	270

<sup>1)</sup>RME, Raps Metyl Ester är en FAME baserad på raps. Standard SS-EN14214

## 6.5 Osäkerhetsfaktorer som påverkar sannolikheten för antändning

Att ytor i cisternen uppnår produktens AHT är emellertid inte ensamt tillräckligt för att avgöra hur stor risken är för antändning och brandspridning. Även vid uppnådd AHT är det som enskild företeelse inte säkert att vätskan eller ångan antänds med en gång inne i en cistern som utsätts för stark yttre värmepåverkan p.g.a. brand. För att skapa en tändning krävs nämligen att flera sammanfallande faktorer inträffar samtidigt, t.ex. att rätt blandningsförhållande och syrehalt föreligger som är tillräcklig för att en brand eller explosion skall kunna ske (d.v.s. ej över- eller underkarborerat). Vidare kan även som nämnts ovan andra orsaker bidra t.ex. förekomst av ventilationsöppningar, gasströmning, tryckökning inuti cisternen eller ev. gnistbildning inne i eller utanpå cisternen m.fl. yttre faktorer som också kan inverka på sannolikheten för antändning. En känd orsak till brandspridning är att flamman från intilliggande cisternbrand direkt berör näraliggande cistern, vilket gör att temperaturen snabbt kan stiga till väl över AHT. I det senare fallet, cisternbrand där intilliggande cistern utsätts för flampåverkan, kan ökad risk föreligga för brand eller explosion.

Alla dessa faktorer sammantaget medför alltså, att AHT inte ensamt är den faktor som bestämmer risken för brandspridning, eftersom det samtidigt krävs förekomst av en brännbar atmosfär för att en tändning skall uppstå (se grafen Fig. 2). Det innebär med andra ord att det föreligger mycket stora osäkerheter kring riskvärderingen inklusive sannolikheter för tändning och eventuell brandspridning mellan cisternerna, om man endast använder AHT som avgörande riskkriterium. I Drivkraft Sveriges beräkningsmetodik utgår man emellertid ifrån av praktiska skäl vid beräkningen att en temperatur motsvarande AHT på cisternens topp leder till antändning av cisternens innehåll. *Detta är en medvetet vald och mycket konservativ bedömning som förutsätter att en antändbar gas/ångor blandning föreligger inuti cisternen.* I många av de fall där Drivkraft Sveriges beräkningsprogram används kommer programmet visa att det finns en spridningsrisk.

En spridning av en cisternbrand (Ref. 11) vidare till intilliggande cisterner är enligt erfarenhet från petroleumindustrin oftast orsakad av direktkontakt av flamman. Brandspridning enbart genom värmestrålning är därför inte trolig såvida inte lagringstemperaturen hos produkten närmar sig begynnelsekokpunkten för vätskan ifråga. Exempelvis för bensin med en begynnelsekokpunkt på ca + 25°C finns risk för brandspridning genom antändning av utströmmande ångor medan det för diesel med en begynnelsekokpunkt på ca +180°C är osannolikt att en brand sprids på detta sätt enbart genom yttre värmepåverkan.

En orsak till att kokpunkten kan ha stor betydelse för brandspridningen kan vara vilken typ av lösning som

används för avluftning av cisternen vid brand (ref 13). Mycket talar för att om en vek taksvets har öppnat sig vid cisternbrand på ett sätt som lett till brandscenario i den brandutsatta cisternen som liknar en "fiskmun" d.v.s. en oval öppning i plåtskarv mellan cisternens taksvets och cisternmantel. När väl "fiskmunöppningen" är ett faktum, ger cisternens yttertak efter för branden och plåten veknar i sin tur av värmepåverkan. För cisterner som har väl tilltagna åtgärder för att ventilerat ett övertryck bör risken för "fiskmunsbildning" (och därmed brandspridning) vara reducerad.

För att bestämma om eller när en lagertank under atmosfäriskt tryck (trycklös) innehållande kolväteprodukt nära en brand kan antändas eller skadas p.g.a. att cisternen utsätts för värmestrålning, måste värmestrålningens nivå (värmeeffekt) från branden först fastställas. Beräkning av värmestrålningen från en brand till en intilliggande cistern kan ge ett antal viktiga ingångsvärden för bedömningar av:

- om eller när en cistern kan antändas
- den potentiella skadeverkan en brand kan ge på omgivningen
- separeringsavstånd som behövs mellan cisterner
- typ och nivå på skydd som behövs för att förebygga brandspridning

Enligt avhandling om brandpåverkan mellan cisterner författad av Dr Khaled Mansour Loughbury University UK (ref. 11, sid 50 samt LASTFIRE Incident Survey, ref. 12), har det dragits slutsatser från erfarenheter från ett stort antal bränder att eskalering från enbart värmepåverkan från en fullt utvecklad cisternbrand till närliggande cisterner är osannolik, såvida inte innehållet i den närliggande (värmepåverkade) cisternen har en kokpunkt nära den omgivande lagringstemperaturen.

Vissa produkter lagras i cistern under ett inre s.k. flytande tak. Vid stark yttre värmepåverkan kan tätningar på det flytande taket inuti cisternen bli påverkade på ett sådant sätt att gaser börjar ta sig igenom till ovasidan av det inre flytande taket. Om brandpåverkan blir så stark att lokal kokning i produkten inträffar kan inspektionslucka/luckor i det flytande taket komma att öppnas varvid antändbara ångor riskerar att spridas till utsidan av cisternen eller antändas genom heta plåtytor (explosionsrisk).

Kokpunkten på produkten i den uppvärmda cisternen p.g.a. värmestrålning har en betydande inverkan på tiden innan brandspridning/eskalering av branden sker/Ref. 11, sid. 53/. Tändningen av den andra naftacisternen i Singapore 1998 inträffade inom 2 timmar efter en fullt utvecklad cisternbrand i den först antända cisternen. Omgivningstemperaturen var 27°C och kokpunkten var endast 36°C. Beräkningsmodellen i avhandlingen förutsade att, om den andra (värmepåverkade)

cisternen innehållit fotogen, skulle brandspridningen genom värmepåverkan tagit ca 20 timmar även om kylning inte använts. Denna typ av beräkning visar att, i de fall det finns en stor skillnad mellan kokpunkten på en produkt och lagringstemperaturen, så har både cisternen och produktvolymen en så pass stor termisk kapacitet att värmestrålning är osannolik som ensam källa till brandspridning. Detta är den främsta orsaken till att endast en enskild händelse med brandspridning (med lagring av nafta) blivit rapporterad där en fullt utbredd cisternbrand skapade en brandspridning till en tank med flytande tak enbart orsakad av värmestrålning.

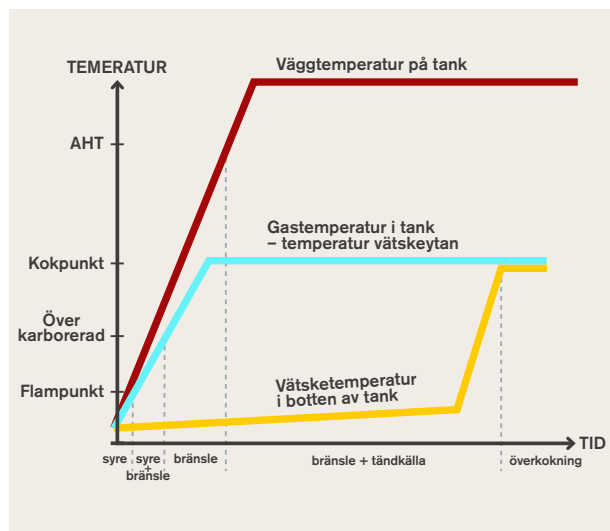


Bild 6. Grafen illustrerar sambanden mellan temperaturökning och antändningsrisk. Tändning kan endast ske där flera sammanfallande parametrar samtidigt infaller för antändning.

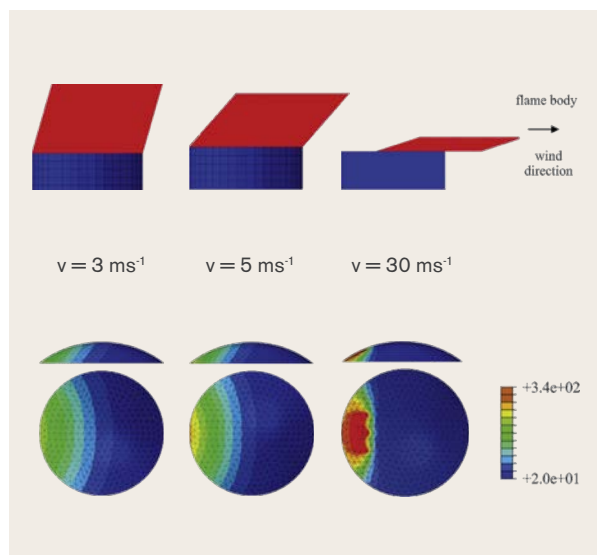


Bild 7. Värmeutveckling på strålnings exponerat cistertak/ Ref. 9/ vid värmepåverkan från brand med olika vindhastigheter.

Det betyder att själva uppvärmningen i sig inte bedöms som sannolik som ensam möjlig tändkälla enligt alla de erfarenheter som vunnits från tidigare cisternbränder

(ref. 10, 11). Andelen cisternbränder som uppstått genom enbart värmeöverföring är i klar minoritet (2-5 %, ref. 11). Tändkällan är snarare direkt flampåverkan på cisternens topp genom vind eller p.g.a. utläckande gaser som antänds från ventilationsöppningar. En uppnådd temperatur till AHT är alltså inte den faktor som, utan att andra förhållanden samtidigt inträder, ensamt kan antända vätskan i cisternen utan syresättning, ej överkarborerad atmosfär m.fl. faktorer måste också samtidigt infalla.

Grafen i Figur 2 ovan visar att vätsketemperatur endast mycket långsamt stiger vid yttre brandpåverkan. Den tid som då åtgår för att skapa höga gasflöden och ev. antändningsrisk blir då betydligt längre än den beräknade tiden till temperaturen för AHT sannolikt minst en timme eller flera timmar beroende på cisternens placering, innehåll och volym (inkl. fyllnadsgrad). Direktpåverkan av flammor på intilliggande cisterns tanktopp redan från start genom vindpåverkan är därför mer sannolik tändorsak.

Figuren visar också att när värmen uppgår till kokpunkten för vätskan följer gastemperaturen temperaturen i vätskeytan. Slutsatsen blir att strålningspåverkan (vid uppnådd temperatur för AHT) inte ensam är den sannolika antändningsorsaken vid brand i produkter. Vid direktpåverkan av flammor från intilliggande brinnande cistern är spridningsrisken mycket större jämfört med om endast värmestrålning påverkar.

Med utnyttjande av Drivkraft Sveriges beräkningsprogram kan tidsbesparande beräkningar göras vid värderingen av brandspridningsrisken. Eventuella behov av kylning eller andra åtgärder kan prövas på ett relativt enkelt sätt. Däremot, om utfallet av beräkningarna indikerar snabb uppvärmning av cisterner, kan kompletterande riskanalyser behöva utföras med behov av fördjupade analys av brandspridnings- eller tändningsrisken. Drivkraft Sveriges beräkningsprogram är avsett som en hjälp för en användare att värdera med vetenskapligt etablerade metoder ev. riskreducerande åtgärder i ett första steg för att värdera risken för brandspridning och ett eventuellt behov av kylning eller andra åtgärder på den egna depån. Drivkraft Sveriges beräkningsprogram kan därför, utifrån kriteriet att antändning kan ske då temperaturen nått AHT, skapa en vetenskapligt baserad bedömning i ett första steg av beräkningar för bedömning av risken för brandspridning. För vissa cisternkonfigurationer, t.ex. cisterner som ligger nära varandra (inom en cistern diameter eller mindre) och påverkas av snabb värmepåverkan från brand, i dessa fall kan en mer detaljerad analys av skyddsbehovet och dess utförande runtomkring cisternen behöva utföras i flera steg.

Givet att inga buskar eller annan vegetation finns i invallningarna eller deras närhet, som kan ge upphov till gnistor och flygbränder, så kommer risken för brandspridning inom oljedepåer i första hand domineras av strålning och konvektion från brinnande vätskeytor.

## 6.6 Spridningsförlopp i modellen

Följande huvudscenarios har bedömts som relevanta för bedömningen av brandspridningsrisk utifrån de händelsekedjor som redovisas ovan:

- Brand i invallning som påverkar cistern inom invallning (Fall 1)
- Invallningsbrand med värmepåverkan på cistern utanför invallningen (Fall 2)
- Brand i cistern med värmepåverkan på annan cistern (Fall 3)

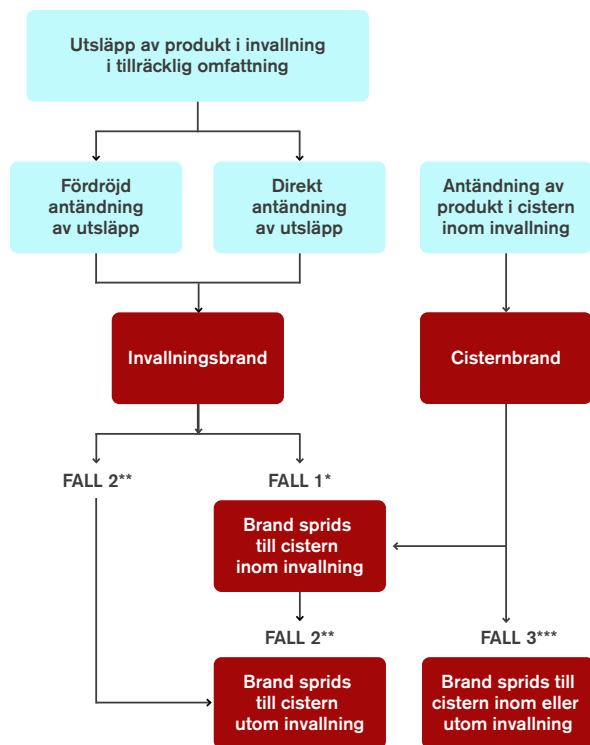


Bild 8. Flödesschema vid beräkningsgång med beräkningsverktyget

\* Cistern inom invallning antänds. Om spillet brinner upp innan cisternen inom invallningen antänds stoppar scenariot där. Om cisternen antänds beror vidare utveckling av scenariot på om invallningsbranden hinner påverka cistern utanför invallningen innan produkten brunnit upp (Fall 2). Invallningsbrand har större påverkan på cisterner utanför invallning än en cisternbrand. Hinner invallningsbranden inte antända intilliggande cistern så skall cisternbranden modelleras (d.v.s. en cistern brinner och strålar mot en hotad cistern, Fall 3).

\*\* Cisternen har genom beräkning av Fall 1 fullgott skydd som motverkar antändning av cistern inom invallning. Invallningsbranden påverkar en cistern placerad utanför den aktuella invallningen.

\*\*\* Cisternbrand påverkar annan cistern. Detta kan vara två cisterner inom en invallning eller en cistern i invallning och en utanför invallning

### 6.6.1 Fall 1 – Brand i invallning som påverkar cistern inom invallning

Invallningsbrand som ger direktpåverkan av flammor på hotad cistern inom invallning.



Bild 9. Fall 1

Brand inne i invallning kan indelas i två undervarianter av brandfall (gäller Fall 1 och 2):

- Brand i invallningens överkant där ångorna brinner
- Brand i bränsleytan. I detta fall är invallningens höjd begränsad. Avbrinnetid för bensin är ca 5 mm/min.

Parametrar som är viktiga att ta med i bedömningen av brinntid för brandfarlig vätska inne i invallningen är

- Vätskedjupet i invallningen
- Avbrinnetshastigheten i mm/min.

När man gör beräkningar av brandspridning, är det att betrakta som ett konservativt antagande att flammans bas befinner sig vid invallningens krön.

Om vätskan inte täcker botten beräknas flammans bas ligga nära botten av invallningen.

Cisternens mantelplåt utsätts i Fall 1 för brand i ångor respektive brand i vätskeyta för direkt brandpåverkan. Tiden för metallens uppvärmning till temperaturen för AHT antas bli kort. Antändningen av *hela* vätskemängden kommer ej ske direkt om vätskans temperatur understiger flampunkten eftersom det tar tid att värma upp vätskevolymen i cisternen.

En uträkning av brinntiden av invallningsbrand skall jämföras med tiden för att nå AHT som beräknas med hjälp av Drivkraft Sveriges beräkningsprogram för Fall 1 och Fall 2. Skälet till att denna uträkning behöver göras **för Fall 1 och Fall 2**, är att om bränslet inuti invallningen brunnit upp *innan* cisternens innehåll antänds (d.v.s. innan temperaturen för AHT uppnås för produkten), förhindrar det brandspridning till vätskan inuti cisternen. Risken för brandspridning till omgivningen bedöms i just detta fall som låg. Observera dock att utströmmande ångor från cisternens avluftningar relativt tidigt kan antändas av lågor eller gnistor. *Denna explosions-/brandrisk hanteras dock inte i denna rekommendation.* Läsaren uppmanas för enkelhetens skull använda de antagna

mängduppgifter som verksamhetsutövaren använt i de befintliga riskanalyser depån redan har för bedömning av brandrisker i den egna depån.

#### Exempel på brinntidsberäkning på spill inne i invallning:

Anta en area på brinnande produkten (exkl. sammanlagda cisternytor) = 300 m<sup>2</sup>.

Välj därefter mängd bränsle som spillts ut i invallningen till 100 m<sup>3</sup>. Brinnhastighet för bensin är ca 0,5 cm/minut.

Bränslehöjden blir då: 100 m<sup>3</sup> / 300 m<sup>2</sup> = 0,33 m d.v.s. ca 33 cm.

Brinntiden blir för 33 cm vätskedjup: 0,5 cm/min = 66 minuter.

Slutsatsen av detta blir, att om brinntiden för invallningsbranden är kortare än tiden (enl. Drivkraft Sveriges beräkningsprogram) för att uppnå termisk tändtemperatur utgör invallningsbranden inte ett allvarligt hot mot antändning av cisternens innehåll.

### 6.6.2 Fall 2 – Invallningsbrand med värme-påverkan på cistern utanför invallningen.

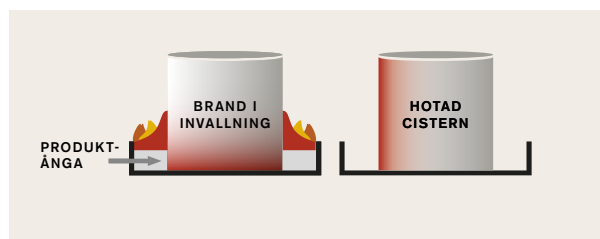


Bild 10. Fall 2

Följande förhållande behöver beaktas för Fall 2:

Är cisternerna inneslutna i lågor sker en snabb upphettning av mantelplåten vilket kan leda till antändning av cisternen upptill, då temperaturen i mantelplåten över produktnivån överstiger temperaturen för AHT. Runt den uppvärmda manteln kommer troligen lokal avångning ske med gaser som kan antändas. Fullt utvecklat brandförlopp fördröjs troligen beroende på vilken mängd och vilken typ av produkt som finns lagrad inuti cisternen.

Brand i invallning kan, beroende på mängd brännbar vätska som antänds, vara potentiellt farligare än brand i cisternens topp. Det beror på att branden som omsluter cisternen inuti den brinnande invallningen kan starta en cisternbrand inuti invallningen som då ökar värmeavgivningen åt sidorna avsevärt. Vidare är invallningen som sådan lägre vilket gör att den sammanlagda värmeavgivande ytan som kan påverka intilliggande cistern kan bli stor.

En tätning i ett s.k. "flytande tak" står emot temperaturer upp emot 200°C. Överskrids denna temperatur på insidan av cisternväggen kan ångor ta sig igenom tätningen och sippra ut ovanpå den flytande takkonstruktionen. Detta förhållande kan vara riskfyllt p.g.a. att det finns en

relativt sett större mängd syre i atmosfären i utrymmet som därmed kan bidra till att brännbar atmosfär bildas.

### 6.6.3 Fall 3 – Brand i cistern med värme-påverkan på annan cistern.

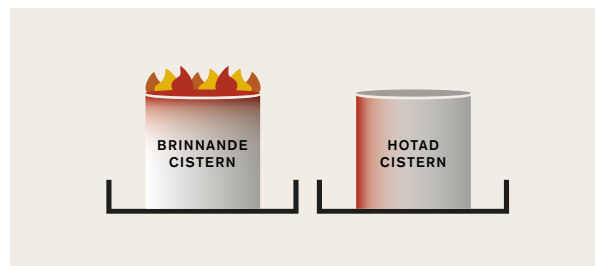


Bild 11. Fall 3. OBS. Fall 3 gäller även där den "hotade" cisternen är helt friliggande (ej invallad).

Scenariot gäller när antändning sker av cistern utan brand i invallningen, eller där produkt i invallningen brunnit upp. Det finns en risk att cisterner som är belägna nära varandra (< 1 cistern diameter) och som vid brandtillfället är utan vattenkylning eller värmeisolerings eller andra skyddsåtgärder, riskerar cisternen fatta eld inom en relativt kort tidsperiod (främst genom flampåverkan).

## 6.7 Modellförutsättningar i Drivkraft Sveriges beräkningsprogram

Beräkningsförutsättningar och de fysikaliska modellerna redovisas i Appendix.

Drivkraft Sveriges beräkningsprogram har konstruerats med nedanstående förhållanden i åtanke.

Modellerna som använts i programmet är baserade på vetenskapligt erkända beräkningsmetoder. Dessa metoder bygger på experiment, praktiska brandförsök, utredningar, litteraturstudier etc. Värden för parametrar i Drivkraft Sveriges beräkningsprogram är verifierade med empiriska data (praktiska försök) inom nedanstående intervall. Används värden utanför de angivna intervallen ökar osäkerheten på resultatet. För bensin och diesel är intervallet för den brinnande ytans area 10–1000 m<sup>2</sup>. För Etanol är ytan 10 - 300 m<sup>2</sup>. De värden som anges i inmatningsraderna i Drivkraft Sveriges beräkningsprogram beskriver de ramar inom vilka beräkningsprogrammet kan användas med största precisionen.

I de fall specifika indata för fysikaliska egenskaper och vindhastighet saknas kan nedanstående data användas (för de tre vanliga drivmedelstyperna).

	Kokpunkt (°C)	Värmekapacitet (kJ/kg°C)	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Ångbildningsvärme (kJ/mol)
Etanol	78	2,4	792	38,6
Bensin	27	2,0	720	30 (*)
Diesel	180	1,8	802	30 (*)

\*)Hexan: 30 kJ/mol

Vindhastighet bör väljas utifrån ett intervall mellan 2,6 m/s till och med 7,0 m/s.

Uppstår tveksamhet om lämplig vindhastighet, välj i första hand 5 m/s, som enligt SMHI är den medelvindhastighet som uppmätts över året i landet.

#### **Drivkraft Sveriges beräkningsprogram kan enkelt uttryckt göra följande:**

Drivkraft Sveriges beräkningsprogram är tänkt som ett användarvänligt verktyg som en användare kan nyttja och bedöma storleken på värmestrålning från en simulerad invallningsbrand eller cisternbrand. Med olika beräkningar och ändringar av skilda variabler, kan ev. risk för brandspridning och ev. behov av kylinsatser bedömas på ett smidigt sätt för en viss simulerad lagringskonfiguration. Drivkraft Sveriges beräkningsprogram kan användas också för beräkning av värmepåverkan från en brinnande cistern som befinner sig på en högre eller lägre nivå i förhållande till det "värmebestrålade" objektet. Detta kallas för vinkelkoefficienter vid värmestrålning. Se Appendix med beskrivning av de fysikaliska beräkningsmodellerna, sist i dokumentet.

Drivkraft Sveriges beräkningsprogram tar även hänsyn till de nya rön som kom ut från ett brinnprov med ca 220 m<sup>2</sup> E97 i Borlänge augusti 2012. Resultatet av brinnprovet var bl.a. att etanol avger relativt sett högre värmeeffekt på kortare avstånd (10-tals m) jämfört med motsvarande brinnyta för bensin. Detta kan påverka hur fort en cistern värms upp om etanolicistern antänds i en depå.

#### **Det här kan Drivkraft Sveriges beräkningsprogram inte användas till:**

Drivkraft Sveriges beräkningsprogram kan däremot inte användas för att beräkna hur stor sannolikheten är för att antändning sker. Orsaken är svårigheten med att beräkna hur stor sannolikhet det föreligger för tändning inuti cisternen på grund av att det finns flera olika samtidigt påverkande parametrar som samverkar och

är svårbestämbara, var för sig. Det finns därför stora inneboende osäkerheter vid bedömning av antändningsrisken bortom den teoretiskt beräknade tiden till dess att temperaturen för AHT uppnås. Drivkraft Sveriges beräkningsprogram kan vara ett stöd i jämförelsen mellan olika lagringskonfigurationer och handlingsalternativ i en komplex vallsituation. Drivkraft Sveriges beräkningsprogram kan visa hur förhållanden faktiskt ser ut och ev. behov av åtgärder för att förhindra brandspridning.

### **6.7.1 Uppvärmning av cisternmantel**

Beräkningar avseende brandspridningsrisken med hjälp av Drivkraft Sveriges beräkningsprogram förutsätts ske genom värmestrålning eller genom konvektion (ex. vis upphettning genom direkt värmestrålning och flampåverkan). Vid beräkning av värmestrålning från en vätskebrand uppkommer samtidigt en "dämpning" av värmespridningen i vätskevolymen, som uppkommer där vätskan värms upp långsammare p.g.a. absorption av värmeenergi i såväl vätskan inne i cisternen som i materialet i mantelytan. Även kylning av mantelytan genom konvektion påverkar temperaturstegringen.

### **6.7.2 Invallningsbrand**

Vid antändning av bränsle i en invallning kommer lågorna först att sprida sig som en växande cirkel från den plats där antändning sker och längs hela bränsleytan. Hastigheten för denna så kallade "flash fire" är i storleksordningen 3-13 m/s om man inte tar hänsyn till vind. När ytans temperatur närmar sig vätskans kokpunkt och syretillförseln begränsas av invallningsväggarna förflyttas lågornas bas från bränsleytan upp till invallningens krön. Detta beror på att bränsleblandning nere i invallningen då blir för fet för att förbränning ska kunna ske utan extra, tillströmmande syre. Fenomenet beskrevs i detalj i rapporten "Fuel"/ref. 6/ och illustreras i nedanstående figur.

I denna rekommendation görs antagandet att om spillet brinner ut inom en minut, eller inte täcker hela invallningens botten, flyttas inte flamfronten upp till invallningens kant.



Bild 12. Figurerna ovan visar flammornas form omedelbart ovanför vätskeytan vid brand inuti invallning. Flammornas bas höjs successivt upp till invallningskrönet och volymen av oförbrända ångor ökar efter viss brinntid till dess ett jämviktstillstånd inträder i c). I en invallning med en produkt med lågt ångtryck fås sällan något stabilt jämviktstillstånd. Lågornas bas kommer då snarare vandra mellan vätskeyta och invallningskrön. /Ref. 8/.



# 7 ARBETSGÅNG FÖR BERÄKNINGAR I BERÄKNINGSVERKTYGET

## 7.1 Generella användarinstruktioner

I beräkningsverktyget skall data anges i samtliga öppna (vita) celler under fliken Input Output för att beräkning skall kunna utföras. Beräkningsverktyget används för att göra en första kontroll om ytterligare barriärer behövs för att undvika brandspridning mellan cisterner. En fördjupad analys kan behövas för cisterner där risk föreligger.

En del av de indata som ska fyllas in i cellerna under fliken Input output finns att hämta på publika hemsidor, t.ex. medelvärden för lufttemperatur och vindhastighet finns på SMHI hemsida. Under gömda flikarna "Indata bränslen" och "Beräkningsdata" finns flera förvalda beräkningsvariabler. Ändringar av dessa indata skall dock göras med

försiktighet och beskrivs inte detta kapitel. I de fall decimaler används ska dessa anges som kommatecken.

*Drivkraft Sverige vill dock understryka att användning med beräkning av ej verifierade produktdata eller vetenskapligt underbyggda beräkningsvariabler, får ske under användarens eget ansvar.*

Börja med att fylla i de parametrar och siffror i respektive cell som är tillämpliga för din depå. Vi hänvisar läsaren till Drivkraft Sverige beräkningsprogram. Börja med att fylla i de parametrar och siffror som är tillämpliga för avsedd produkt respektive din depå. De siffror du saknar får inhämtas från plankarta alternativt mätas upp på plats (se scenario illustration nedan).

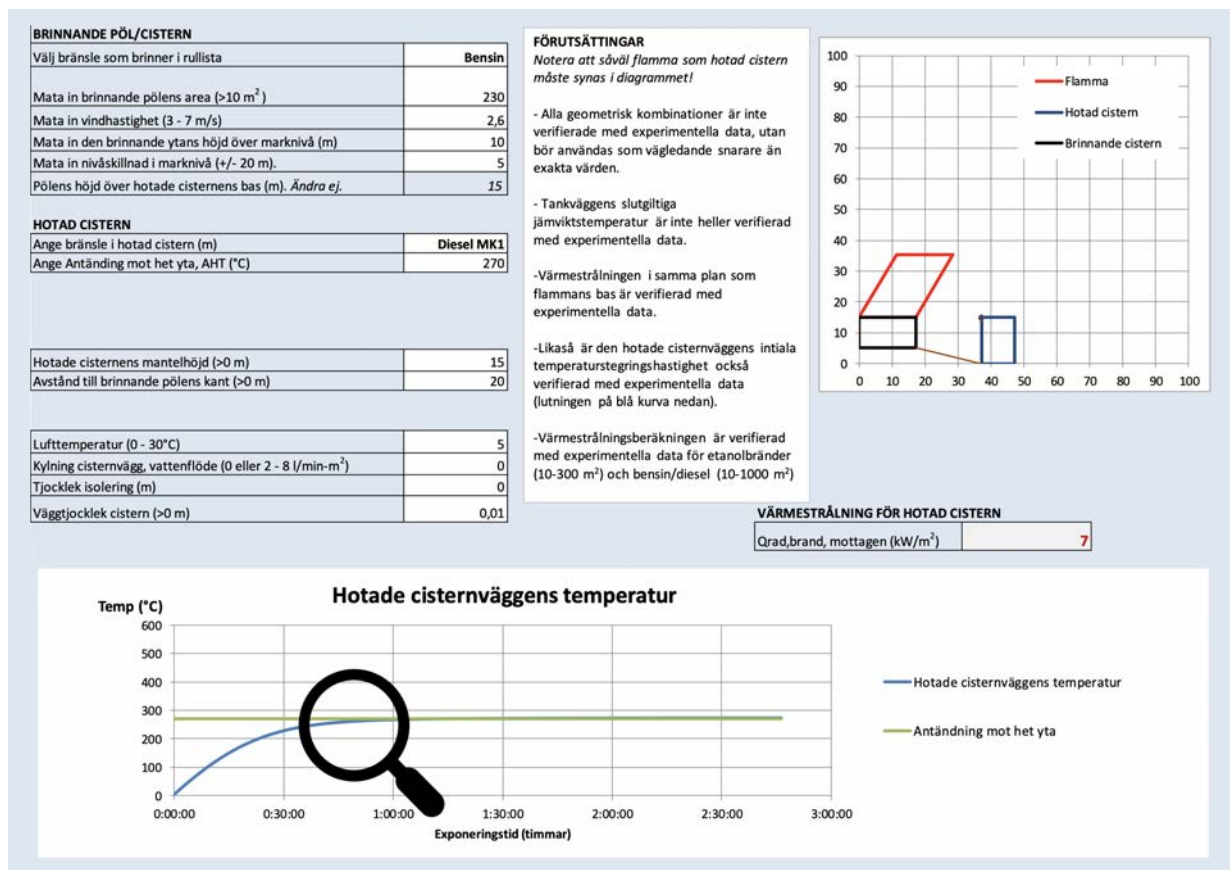


Bild 13. Illustration av kalkylmall och variabler för bedömning av värmepåverkan i Drivkraft Sveriges beräkningsprogram

De beräkningar för den brinnande produkten som beskrivs i exempel för användning av beräkningsverktyget i denna rekommendation, görs i första hand med produkter som har flampunkten + 23°C eller lägre. Beräkningsverktyget klarar dock produkter som f.n. lagras på depåer hos Drivkraft Sveriges medlemsföretag.

## 7.2 Beräkningsexempel Fall 1, Invallningsbrand som ger direktpåverkan av flammor på hotad cistern inom invallning.

I nedanstående beräkningsfall (bild 14) antas hotad cistern stå i invallning där brand pågår.



Bild 14. Fall 1.

### 1. Välj bränsle som brinner i rullista

Markera cellen och välj det bränsle som antas brinna i invallningen.

### 2. Mata in brinnande pölens area (m<sup>2</sup>)

Beräkna arean i invallningen. Cisterners area skall exkluderas och inte medräknas. I bildexemplet nedan räknas arean ut för det rödrutiga området.



Bild 15. a.



Bild 15. b.

### 3. Mata in vindhastighet (m/s).

Medelvindhastighet i meter per sekund som råder där cistern är belägen anges.

Lägsta värdet är 2,6 m/s som får fyllas in i cellen. För värden > 7 m/s se avsnitt 6.5.

### 4. Mata in den brinnande ytans höjd över marknivå (m)

Höjden över marknivån till brinnande ytan anges.

Om bränslet inte täcker hela ytan inom invallningen förväntas pölbrandens bas vara i botten på invallningen. Ange 0,1 meter i cellen.

Om bränslet täcker hela ytan inom invallningen förväntas pölbrandens bas vara i överkant på invallning. Ange invallningens höjd (topp) beräknat från marknivån.



Bild 16. Fall 1. För vidare förklaring se 6.7.2.

### 5. Mata in nivåskillnad i marknivå (m).

Eventuell höjdskillnad anges från brinnande pölens marknivå jämfört med hotad cisterns marknivå.

### 6. Ange bränsle i hotad cistern.

Ange produkt som finns i den hotade cisternen.

### 7. Ange temperatur för antändning mot het yta, AHT (°C)

AHT, anges för produkten i den hotade cisternen. Se Tabell 1 för de AHT som kan användas. Om AHT saknas för ämnet, använd termisk tändtemperatur enligt produktens säkerhetsdatablad.

### 8. Hotade cisternens mantelhöjd (m).

Hotade cisternens mantelhöjd anges.

### 9. Avstånd till brinnande pölens kant (m).

Kortaste horisontella avståndet mellan produkt i invallningen och hotad cistern anges. Om produkten inte förväntas täcka hela invallningsbotten anges avståndet från förväntad produkts pölkant och hotad cisterns mantel. Om produkten och dess brand förväntas täcka hela invallningsbotten anges avståndet till 0,1 meter eftersom cisternen antas stå i brandhärden.

### 10. Lufttemperatur (°C).

Årsmedeltemperaturen i luften för den aktuella orten skall anges.

### 11. Kylning cisternvägg, vattenflöde (l/min\*m<sup>2</sup>).

En första beräkning görs med förutsättningen att

ingen mantelkyllning finns att tillgå på hotad cistern, varken fast installation eller mobil (t.ex. Räddningstjänst med kylkanoner), ange 0 l/minut och m<sup>2</sup> i cellen. Anledningen till det är för att vid en första beräkning få fram om hotad cistern teoretiskt behöver kylning vid en brand i invallningen och om så är fallet, inom vilken tid kylningsinsats måste påbörjas. Se utförligare förklaring kapitel 8, Bedömning av beräkningsresultat.

Om kylningskapacitet finns att tillgå och kan aktiveras utförs ytterligare en beräkning för att verifiera att kapaciteten på denna kylning är tillräcklig. Kylningen kan bestå av fast kylsystem, mobilt kylsystem eller en kombinerad lösning. Om det finns möjlighet till kylning av hotad cistern, anges vilka flöden i liter per minut per och kvadratmeter systemet antas ha.

Att beakta vid beräkning är att tid för påbörja kylningsinsats ska gälla oavsett dag eller tid på dygnet för att det ska vara representativt.

### 12. Tjocklek isolering (m).

Om hotad cistern har isolering av stenull ska isoleringstjockleken anges i meter. Om cisternen ej är isolerad anges isoleringens tjocklek till 0 meter. Smältpunkten är betydligt lägre på glasull och den kan inte rakt av tillgodoräknas som värmskydd vid en brand.

Beakta att även inklädnaden av isoleringen kan påverka skyddsfunktionen. En inklädnad i aluminium kan skadas relativt fort vid en brand och på så sätt påverka isoleringens skyddsförmåga.

### 13. Väggtjocklek cistern (m).

Genomsnittliga tjockleken på cisternens mantelplåt anges. Om uppgifter om saknas är ett representativt medelvärde 0,010 meter (10 mm).

### Beräkning och resultat.

När alla celler är ifyllda, trycker användaren "Enter" för beräkning. I grafen visas om risk för antändning finns och i sådant fall tid till risk för antändning av hotad cistern. Om inte exponeringstidsaxelns blå linje i beräkningsverktyget korsar den gröna finns ingen risk för antändning, och då finns med all sannolikhet heller inget behov för ytterligare barriärer.

## 7.3 Beräkningsexempel Fall 2, Invallningsbrand med värmepåverkan på hotad cistern utanför invallningen.

I nedanstående beräkningsfall antas hotad cistern stå utanför invallning där brand pågår.

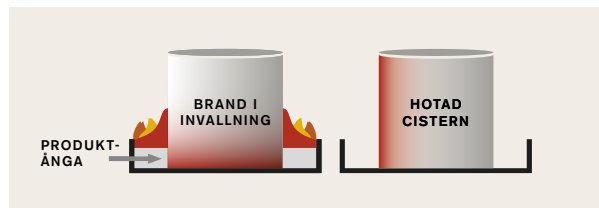


Bild 17. Fall 2.

### 1. Välj bränsle som brinner i rullista.

Markera cellen och välj det bränsle som antas brinna i invallningen.

### 2. Mata in brinnande pölens area (m<sup>2</sup>).

Beräkna arean i invallningen. Cisterners area skall exkluderas och inte medräknas.

I bildexemplet nedan räknas arean ut för det rödrutiga området. Arean ska anges i kvadratmeter.



Bild 18. a.



Bild 18. b.

### 3. Mata in vindhastighet (m/s), minimum 2,6 m/s.

Medelvindhastighet i meter per sekund som råder där cistern är belägen anges.

Lägsta värdet är 2,6 m/s som får fyllas in i cellen. För värden > 7 m/s se avsnitt 6.5.

### 4. Mata in den brinnande ytans höjd över marknivå (m).

Höjden över marknivån till brinnande ytan anges.

Om bränslet inte täcker hela ytan inom invallningen förväntas pölbrandens bas vara i botten på invallningen. Ange då 0,1 meter i cellen.

Om bränslet täcker hela ytan inom invallningen förväntas pölbrandens bas vara i överkant på invallning. Det brinner alltså inte vid marknivå, flammans bas har flyttats upp till invallningens kant. Ange invallningens höjd (topp) beräknat från marknivån.



Bild 19. Fall 2. För vidare förklaring se 6.7.2.

### 5. Mata in nivåskillnad i marknivå (m).

Eventuell höjdskillnad anges från brinnande pölens marknivå jämfört med hotad cisterns marknivå.

### 6. Ange bränsle i hotad cistern.

Ange produkt som finns i den hotade cisternen

### 7. Ange temperatur för antändning mot het yta, AHT (°C)

AHT, anges för produkten i den hotade cisternen. Se Tabell 1 (sidan 11) för de AHT som kan användas. Om AHT saknas för ämnet, använd termisk tändtemperatur enligt produktens säkerhetsdatablad.

### 8. Hotade cisternens mantel höjd (m)

Hotade cisternens mantelhöjd anges.

### 9. Avstånd till brinnande pölens kant (m)

Kortaste horisontella avståndet mellan produkt i invallningen och hotad cistern anges. Om produkten inte förväntas täcka hela invallningsbotten anges avståndet från förväntad produkts pölkant och hotad cisterns mantel. Om produkten och dess brand förväntas täcka hela invallningsbotten anges avståndet mellan invallningens kant (topp) och hotad cisternen.

### 10. Lufttemperatur (°C)

Årsmedeltemperaturen i luften för den aktuella orten skall anges.

### 11. Kylning cisternvägg, vattenflöde (l/min\*m<sup>2</sup>)

En första beräkningen görs med förutsättningen att ingen mantelkylning finns att tillgå på hotad cistern, varken fast installation eller mobil (t.ex. Räddningstjänst med kylkanoner), ange 0 l/min\* m<sup>2</sup> i cellen. Anledningen till det är för att vid en första beräkning få fram om hotad cistern teoretiskt behöver kylning vid en brand och om så är fallet, inom vilken tid kylningsinsats måste påbörjas. Se utförligare förklaring kapitel 8, Bedömning av beräkningsresultat.

Om kylningskapacitet finns att tillgå och kan aktiveras utförs ytterligare en beräkning för att verifiera att kapaciteten på denna kylning är tillräcklig. Kylningen kan bestå av fast kylsystem, mobilt kylsystem eller en kombinerad lösning. Om det finns möjlighet till kylning av hotad cistern, anges vilka flöden i liter per minut per och kvadratmeter systemet antas ha.

Att beakta vid beräkning är att tid för påbörja kylningsinsats ska gälla oavsett dag eller tid på dygnet för att det ska vara representativt.

### 12. Tjocklek isolering (m)

Om hotad cistern har isolering av stenull ska isoleringstjockleken anges i meter. Om isoleringen är av glasull anges värdet till 0 meter. Det är för att smältpunkten är betydligt lägre på glasull och den ej kan tillgodoräknas som värmeskydd vid en brand. Om cisternen ej är isolerad anges isoleringens tjocklek till 0 meter.

### 13. Väggtjocklek cistern (m)

Genomsnittliga tjockleken på cisternens mantelplåt

anges. Om uppgifter saknas är ett representativt medelvärde 0,010 meter (10 mm).

I nedanstående beräkningsfall antas hotad cistern stå utanför invallning där brand pågår. Beräkning ska göras för att undersöka om skyddsåtgärder behöver vidtas för cisternen. Vid brand i invallning måste normalt både fall 1 och fall 2 beaktas. Skillnaden mellan fall 1 och fall 2 är att i fall 2 är hotad cistern fysiskt avskild från brinnande produkt.

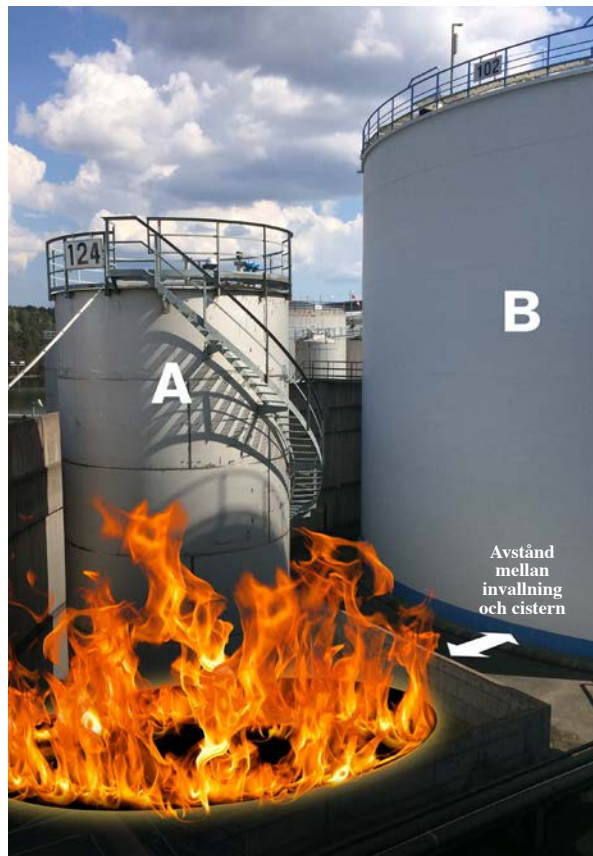


Bild 20. Bild tillhörande fall 2.

## 7.4 Beräkningsexempel Fall 3, Brand i cistern med värmepåvekan på hotad cistern.

I nedanstående beräkningsfall antas hotad cistern stå i närheten av brinnande cistern.

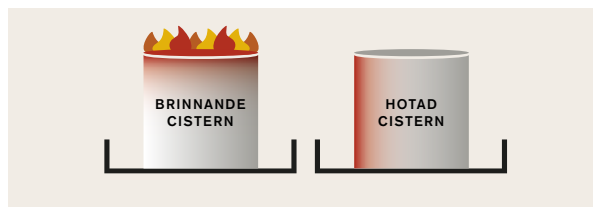


Bild 21. Fall 3.

### 1. Välj bränsle som brinner i rullista.

Markera cellen och välj det bränsle som antas brinna i cistern.

## 2. Mata in brinnande pölens area (m<sup>2</sup>).

Ange area för den brinnande cisternen. Ett representativt värde för att få fram den arean är att använda den area som finns angivet i kalibreringsbevis för cisternen.

## 3. Mata in vindhastighet (m/s), minimum 2,6 m/s.

Medelvindhastighet i meter per sekund som råder där cistern är belägen. Lägsta värdet är 2,6 m/s som får fyllas i cellen. För värden > 7 m/s se avsnitt 6.5.

## 4. Mata in den brinnande ytans höjd över marknivå (m).

Summan av brinnande cisternen mantelhöjd och cisternfundamentets höjd över marknivån anges.

## 5. Mata in nivåskillnad i marknivå (m).

Eventuell höjdskillnad anges från brinnande cisterns marknivå jämfört med hotad cisterns marknivå.

## 6. Ange bränsle i hotad cistern

Ange produkt som finns i den hotade cisternen.

## 7. Ange temperatur för antändning mot het yta, AHT (°C)

AHT anges för produkten i den hotade cisternen.

Se Tabell 1 (sid 11) för de AHT som kan användas. Om AHT saknas för ämnet, använd termisk tändtemperatur enligt produktens säkerhetsdatablad

## 8. Hotade cisternens mantel höjd (m).

Hotade cisternens mantelhöjd anges.

## 9. Avstånd till brinnande pölens kant (m).

Kortaste horisontella avståndet mellan brinnande cisternens mantelvägg och hotad cisternens mantelvägg anges i meter.

## 10. Lufttemperatur (°C).

Årsmedeltemperaturen i luften för den aktuella orten skall anges.

## 11. Kylning cisternvägg, vattenflöde (l/min. \* m<sup>2</sup>).

En första beräkningen görs med förutsättningen att ingen mantelkylning finns att tillgå på hotad cistern, varken fast installation eller mobil (t.ex. Räddningstjänst med kylkanoner), ange 0 l/min\* m<sup>2</sup> i cellen.

Anledningen till det är för att vid en första beräkning få fram om hotad cistern teoretiskt behöver kylning vid en brand i intilliggande cistern och om så är fallet, inom vilken tid kylningsinsats måste påbörjas. Se utförligare förklaring kapitel 8, "Bedömning av beräkningsresultat".

Om kylningskapacitet finns att tillgå och kan aktiveras utförs ytterligare en beräkning för att verifiera att kapaciteten på denna kylning är tillräcklig. Kylningen kan bestå av fast kylsystem, mobilt kylsystem eller en kombinerad lösning. Om det finns möjlighet till kylning av hotad cistern, anges vilka flöden i liter per minut per och kvadratmeter systemet antas ha. Att beakta vid beräkning är att tid för påbörja kylningsinsats ska gälla oavsett dag eller tid på dygnet för att det ska vara representativt.

## 12. Tjocklek isolering (m)

Om hotad cistern har isolering av stensull ska isoleringstjockleken anges i meter. Om isoleringen är av glasull anges värdet till 0 meter. Det är för att smältpunkten är betydligt lägre på glasull och den ej kan tillgodoräknas som värmeskydd vid en brand. Om cisternen ej är isolerad anges isoleringens tjocklek till 0 meter.

## 13. Väggtjocklek cistern (m)

Genomsnittliga tjockleken på cisternens mantelplåt anges. Om uppgifter saknas är ett representativt medelvärde 0,010 m (10 mm).

# 8

## BEDÖMNING AV BERÄKNINGSRESULTAT

I detta kapitel beskrivs kortfattat hur tolkning och bedömning av resultaten från Drivkraft Sveriges beräkningsprogram bör förstås och tolkas. Beskrivningen i detta kapitel är dock inte en helt fullständig redovisning av alla olika tänkbara utfall, med alla svar eller som illustrerar alla möjliga kombinationer av problemställningar. Beskrivningen nedan är mer tänkt som en vägledning med exempel i vad som visas i Drivkraft Sveriges beräkningsprogram, varför och vad Drivkraft Sveriges beräkningsprogram egentligen besvarar, och vad som är möjligt att få ut av dess beräkningar.

### 8.1 Beräkning och resultat

Användaren väljer ut den eller de cisterner (alt. den invallning) som beräkningen skall göras på. När alla celler med uppgifter för den "brinnande cisternen" (eller invallningen) och siffrorna för den "Hotade cisternen" är ifyllda, trycker användaren "Enter" för beräkning. I exemplen och figurerna nedan visas resultatet så som det kan se ut vid utförande av en beräkning. Vi har för enkelhetens skull valt att det är en bensincistern som brinner och att det är en dieselcistern som är den hotade cisternen, med inlagda fysikaliska data för just dessa produkter. Se bild 22.

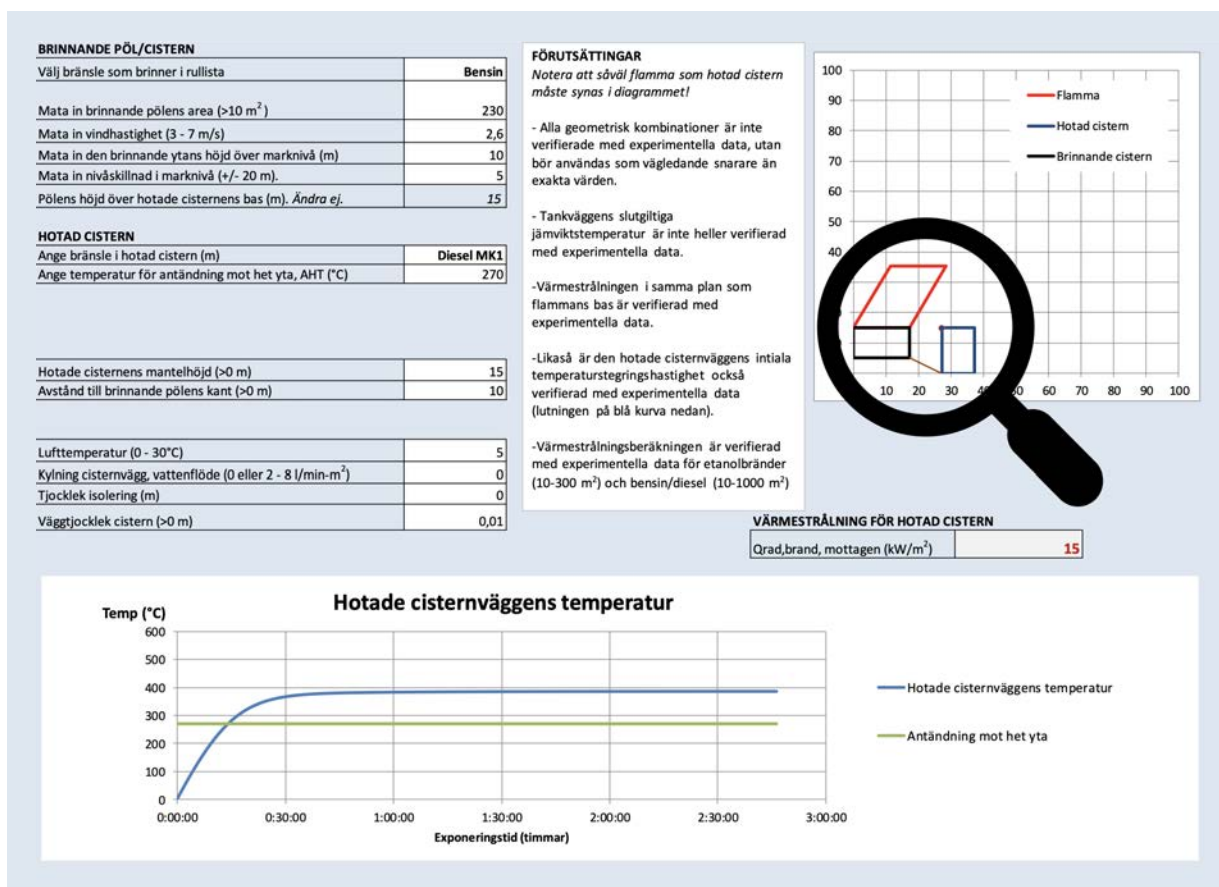


Bild 22.

Se bild 22 föregående sida. Den brinnande cisternens eller invallningens brinnyta i m<sup>2</sup> matas in samt vindhastighet > 2,6 m/s som är en låg vindhastighet (nära vindstilla). Notera att Drivkraft Sveriges beräkningsprogram inte är validerat för vindhastigheter < 2,6 m/s. Drivkraft Sveriges beräkningsprogram kan hantera ev. nivåskillnader mellan cisterner. För att illustrera en ev. nivåskillnad vid beräkningen mellan cisternerna har vi också valt att den brinnande cisternen (t.v.) ligger 5 m högre än den hotade cisternen. Förstöringsglaset markerar cisternerna som skall studeras. Glaset visar dels flammans form och lutning (vindhastighetsberoende) dels cisternernas inbördes förhållanden, d.v.s. om flammans är i direkt kontakt med den "hotade" cisternen eller inte. Notera den lilla röda punkten på övre vänstra hör-

net av "den hotade" cisternen som anger den punkt där strålningsintensiteten är högst och där det är varmest på den hotade cisternen.

Om den röda punkten befinner sig *inne* i flammans (direktpåverkan) kommer händelseförloppet gå snabbt och risken för brandspridning mellan cisternerna är uppenbar. I dessa grafer ovan (inuti förstöringsglaset) visas hur flammans (den röda romben) kommer att luta emot intilliggande cistern vid en brand, givet att det blåser i den riktningen. Brun linje markerar höjdskillnaden i marknivå mellan cisternernas bas. Inmatning görs på raden "brinnande ytans höjd", i övre rutan i Drivkraft Sveriges beräkningsprogram, räknat i meter mellan brinnande och den hotade cisternen.

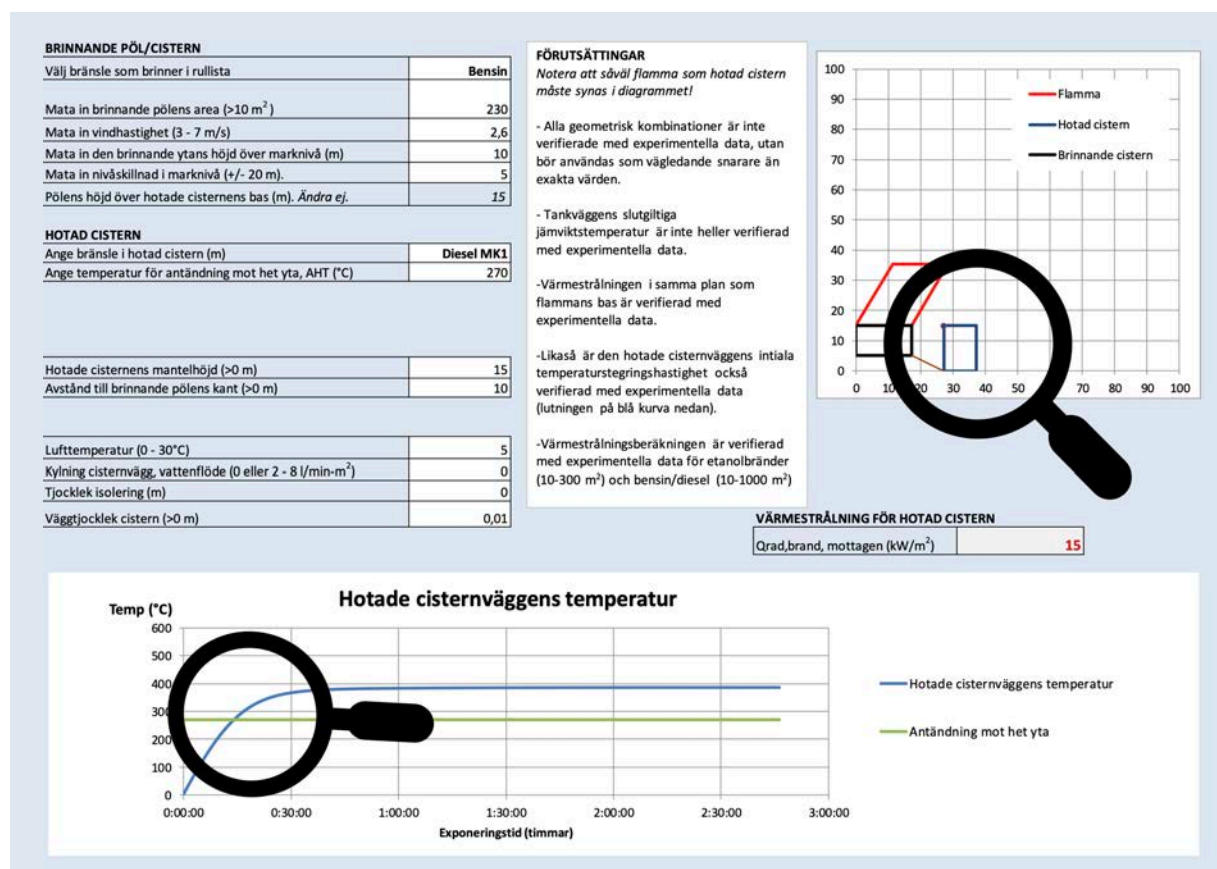


Bild 23.

Den blå linjen visar den hotade cisternväggs temperatur i det översta hörnet riktat mot branden, där det antagits att temperaturen är som högst. Här visas om risk för antändning föreligger, och i sådant fall hur lång tid det beräknas bli till risk för antändning av hotad cistern. Det riskkriterium som används i Drivkraft Sveriges beräkningsprogram är temperaturen för antändning mot het yta (AHT) som visas med en grön horisontell linje i grafen nederst i figuren. Se även teoribeskrivning avsnitt 6.3. Just i detta fall beräknas tiden bli ca 15 minuter till dess en risk föreligger för att temperaturen AHT uppnåtts (Bild 23).

Om *inte* cisternväggs temperatur korsar den gröna linjen, anses det inte föreligga överhängande risk för antändning, eftersom temperaturen för AHT inte har uppnåtts. Detta kan illustreras genom att t.ex. ansätta isolering på 0,10 m, eller anta att vattenkylning ansätts i Drivkraft Sveriges beräkningsprogram, t.ex. 2 liter/min. \* m<sup>2</sup>. Se blå linje som visar cisternväggs temperatur utan isolering i beräkningsverktyget. Om den blå grafen hamnar nära parallellt med eller ej korsar den gröna grafen finns med all sannolikhet i ett sådant fall (med kylning eller isolering) heller inget behov för ytterligare barriärer.

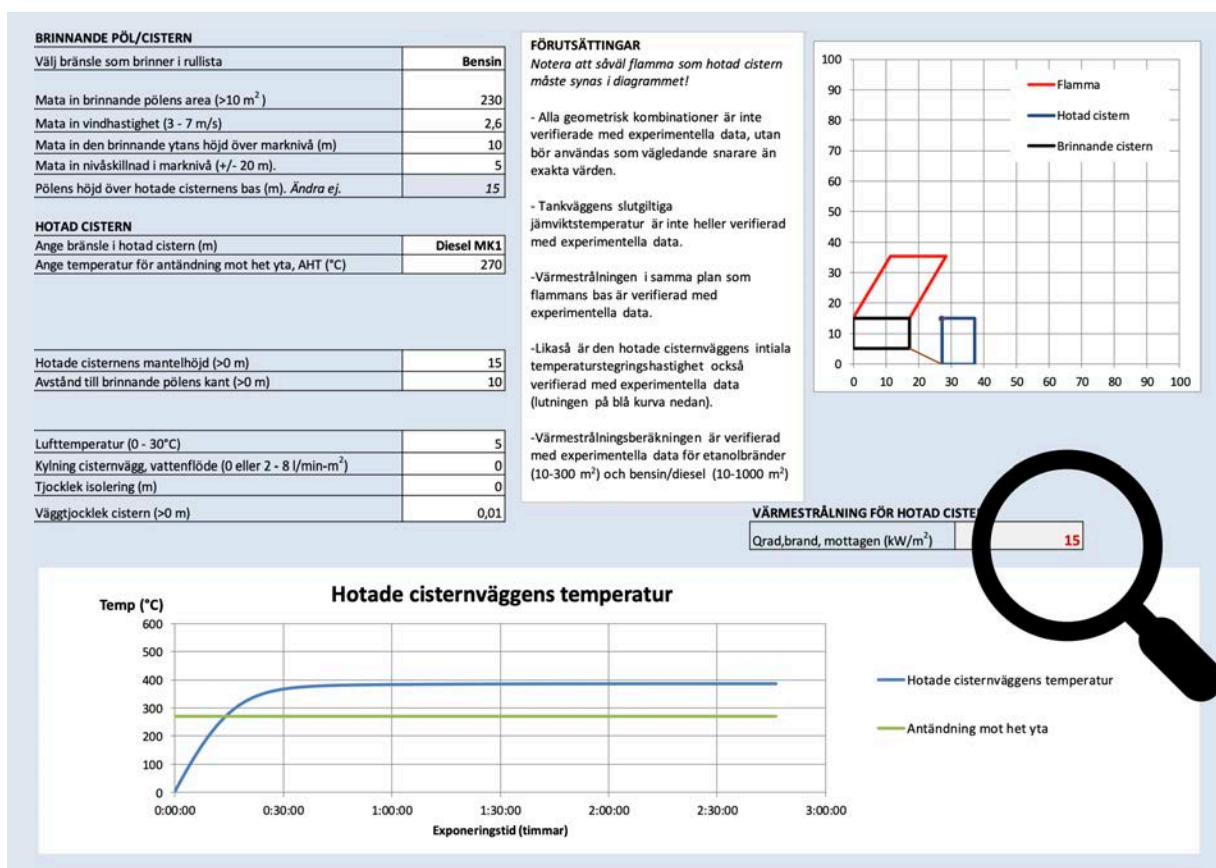


Bild 24.

Se ovanstående bild Bild 24. Värmestrålningen för den exponerade (hotade) cisternen redovisas i cellen nedanför graferna i kW/m<sup>2</sup>. Detta kan vara värdefull information för bedömning av strålningspåverkan på såväl näraliggande cisterner, utrustning, brandskyddsutrustning, mätinstrument, eller liknande. Om man istället önskar bedöma värmeeffektpåverkan av personal för jämförelse, anger man för den "hotade cisternen" istället en höjd på ca 1,8 m (= höjden på personen), där det kan gå att bedöma ungefär hur lång tid som en person kan vistas i den brinnande cisternens omedelbara närhet utan att skadas. Se tabell med värmeeffektvärden som kan tjäna som vägledning, sidan 34/ref. 14/.

#### Ändring av vindhastighet

Ökar vindhastigheten mot den "hotade" cisternen kommer temperaturpåverkan förändras (hetare, kortare tid till termisk tändtemperatur). Kylningen l/min. \* m<sup>2</sup> har tagits bort för att synliggöra skillnaden. Se Bild 24 och Bild 25. I dessa grafer visas hur flammans form (den röda romben) sträcker ut sig vid en brand. Det som är blått är den exponerade d.v.s. hotade cisternen och det svarta är cisternen alt. invallningen som brinner. Brun linje markerar höjdskillnaden mellan brinnande och hotade cistern. Värmestrålningen för den exponerade (hotade) cisternen redovisas i cellen nedanför graferna i kW/m<sup>2</sup>.



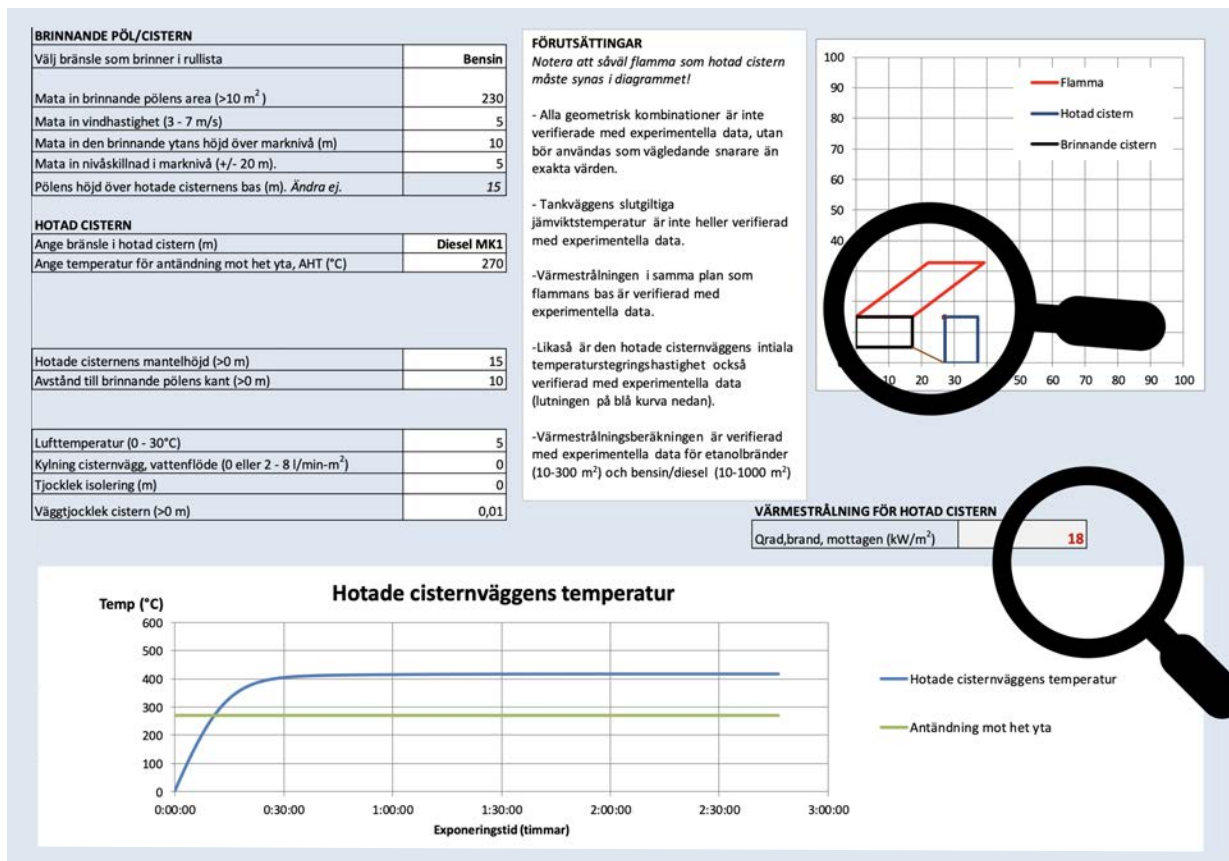


Bild 25. Flammans lutning och därmed värmepåverkan i kW/m<sup>2</sup> på cisternmanteln ändras av ändrad vindhastighet.

För att en cisternbrand skall uppstå, måste som nämnts ovan i Kap. 6 m.fl. ställen också flera *andra* parametrar sammanfalla samtidigt, för att en värmepåverkan skall anses kunna antända en cistern och leda till fullt utvecklad brandspridning. I Sverige inträffade en cisternbrand senast 1956, men då p.g.a. spill.

Skilda bedömningar av spridningsrisk för brand kan förekomma i andra länder jämfört med bedömningar i Sverige av såväl verksamhetsutövare som av myndigheter.

Det beror på dels att andra lagstiftningar finns som tillåter riskbedömningar att använda framräknade gränskriterier för bedömning av risk, dels finns i större inter-

nationella företag företagsinterna krav för bedömning av barriärer till hjälp för att förhindra brandspridning (eller andra risker). Detta leder till att sannolikheten för bedömning av brandspridning naturligtvis inte kan bli en exakt siffra, men statistiska data kan tjäna som en jämförelse och ge en grov uppskattning om storleksordningen på spridningsrisken p.g.a. enbart värmeöverföring. Utifrån hittills gjorda erfarenheter och tillgänglig statistik, bedöms alltså risken för brandspridning enbart genom värmepåverkan som låg.

För brand i hetzonsbildande produkt (t.ex. crude oil) behövs risker med överkokande cistern studeras mer noggrant.



Källa: MSB Erik Egerdt

Bild 26. Fotografiet visar gränsen för vätskenivån inuti cisternen och hur vätskan "kylt" mantelytan vid branden på en av cisternerna. Den brandutsatta ytan av mantelplåten har mjuknat och dragit sig in mot centrum av cisternen. Den del av cisternmantel som är intakt nedanför den skadade mantelplåten visar var vätskenivån stått, vätskan "kyler" mantelytan. Bilden är tagen i Buncefield, England 2005.

# 9

## ÅTGÄRDER – PLANERING OCH ÖVERVÄGANDEN

### 9.1 Åtgärdsplanering om skyddsbehov av cisterner har identifierats

Om beräkningar visat att spridning av brand genom flampåverkan/uppvärmning kan ske mellan cisterner, eller mellan invallningar och cisterner, kan ev. åtgärder behöva vidtas.

Om kritisk tid för spridning är kortare än den tid det tar att få effektiv vattenbegjutning med räddningstjänstens mobila resurser av den hotade cisternen, behöver analysen fördjupas och eventuellt skadebegränsande åtgärder vidtas.

Följande tillvägagångssätt kan användas för bedömning:

1. Använd beräkningsverktyget för att göra en nulägesanalys för alla cisterner och bedöm om det finns eller inte finns en risk för att brandspridning föreligger innan den dimensionerande insatstiden för påbörjande av kylning.
2. Kontrollera med lokala räddningstjänsten *hur lång tid* som behövs innan effektiv kylning kan påbörjas. Jämför denna tid med faktiskt uppmätta tider tills annan extern resurs har satts in på depån. Fastställ en dimensionerande insatstid för påbörjande av kylning med hjälp av räddningstjänsten. Om depån själv har resurser eller möjligheter att kyla med fast eller mobilt system, ska den kortaste tiden innan kylning behöver påbörjas användas i de fortsatta beräkningarna i Drivkraft Sveriges beräkningsprogram.
3. Om man inte hinner kyla innan risk föreligger för brandspridning, behöver verksamhetsutövaren undersöka om olika skyddsåtgärder kan räcka för att förhindra brandspridning. Skyddsåtgärder kan t.ex. vara att undersöka om:
  - Ändra cisternkonfigurationen (d.v.s. var man lagrar vilken vätska). Omflyttning av produkter mellan depåns cisterner kan övervägas, om det inte påverkar tillståndet för lagring etc.
  - Mobil kylning kan vara genomförbar med mobil kylningsutrustning
  - Värmeskyddande barriärer i form av strålskärmar eller isoleringsmaterial
  - Fast kylningsinstallation (nära avstånd)
  - Ändrad fyllnadsgrad (medelfyllnadsgrad) påverkar även tiden och sannolikheten för när en brännbar blandning bildas och därmed möjlig brandspridning.
4. Om förnyade kontrollberäkningar med Drivkraft Sveriges beräkningsprogram *efter* en tänkt omflyttning av produkt eller användande av andra barriärer mellan cisternerna fortfarande visar att brandspridningsrisk fortfarande kan föreligga, behöver en ny och fördjupad analys göras. Detta bör i så fall ske under medverkan av specialist inom bolaget, eller med hjälp av externt konsultstöd.
5. Följande åtgärder bör övervägas vid den fördjupade analysen:
  - En utökad konsekvensutredning av spridningsrisk bör göras med beaktande av fyllnadsgrader, inverkan av förekomst av flytande tak etc. I vissa fall kan viss spridningsrisk vid förhållanden med låg sannolikhet för brandspridning även kunna accepteras.
6. Om en fördjupad analys inte verifierar tillfredsställande skydd, krävs projektering av passiva eller aktiva skyddsåtgärder på cisternerna, se Bild 27.

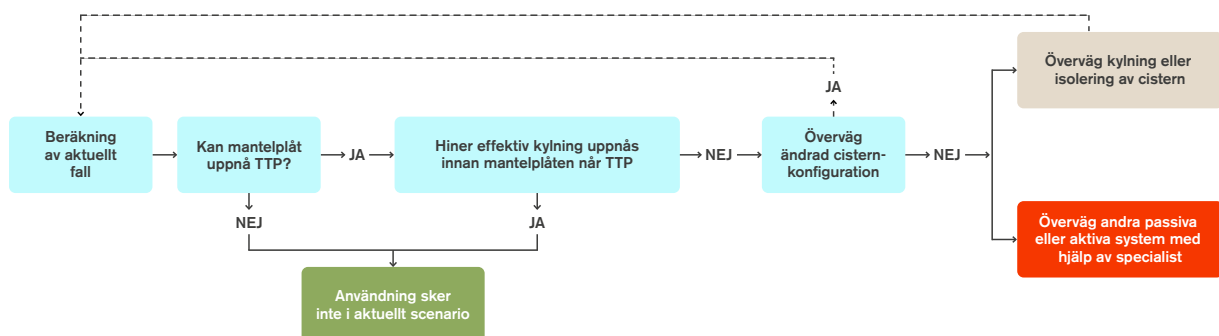


Bild 27. Metodik för val av åtgärder.

## 9.2 Tekniska grundprinciper för att skydda cisterner mot värmestrålning

Skydd mot brandspridning mellan cisterner på en depå kan uppnås genom olika lösningar. Det kan vara aktiva system som t.ex. fasta eller mobila kylsystem, eller passiva system i form av strålningsskärmar, isolering av cisterner o.s.v.

Det finns ingen universallösning som passar alla situationer eller samtliga varianter av depåer eller cisterner. Se även avsnitt 9.2.2.

### 9.2.1 Passiva skadebegränsande åtgärder

Nedan listas ett flertal olika handlingsalternativ som kan väljas för att skydda cisternen mot brandspridning. Alternativerna kan vara som enskilt vald lösning, eller användas i kombination med varandra.

#### Cisternkonfiguration

Olika cisternkonfigurationer (inbördes omflyttning av vätska och placering samt fyllnadsgrad) kan behöva modelleras med hjälp av Drivkraft Sveriges beräkningsprogram.

T.ex. användning av mindre cisterner för etanolagring visavi bensin eller diesel-cisterner. Exempel; antag att det finns etanolagring på en depå, som idag lagras inne

i en invallning tillsammans med diesel. Exemplet utgör ett slags värsta fall vid brand, eftersom diesel har relativt sett lägst temperatur för AHT. I ett sådant lagringsupplägg med samlagring av etanolvolymmer och diesel- eller bensinvolymer, bör depåägaren överväga att flytta etanolagringen till en cistern längre bort, eller helst lagras i flera relativt sett mindre cisterner om sådana finns tillgängliga på depån. Det senare alternativet har två fördelar; dels blir det lättare att få kontroll över och släcka en etanolcisternbrand, dels avges inte lika stora värmeeffekter vid cisternbrand (p.g.a. mindre brinnyta) och därmed inte utgör samma risk för brandspridning till övriga depån. Viktigt är att betrakta den högre värmeavgivning som etanol har i jämförelse med bensin, med samma brinnyta/ref. 4/.

Kontroll av risk för brandspridning med nya konfigurationer genomförs i första utifrån vilka mängder o.s.v. för respektive produkt hanteringstillståndet och miljötillståndet medger, och inom ramen för andra gällande myndighetstillstånd. Utöver detta måste cisternbesiktningsskrav, packningarnas resistens mot läckage för ifrågasvarande produkt etc. tillgodoses innan omflyttning av produkter inom depån sker. Använd på nytt beräkningsverktyget för den nya cisternkonfigurationen för att undersöka om brandspridningsrisk fortfarande kvarstår.

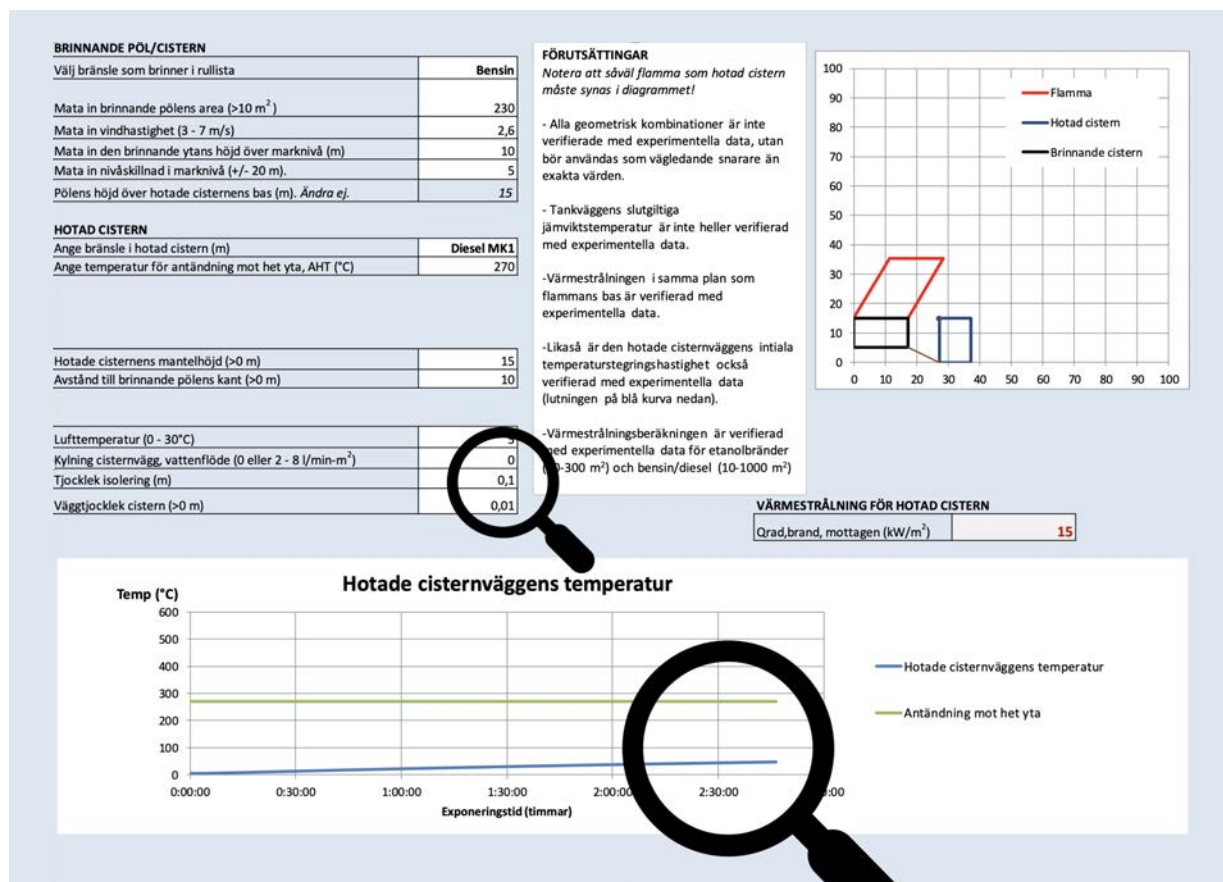


Bild 28. Ovanstående bild visar om man väljer ca 10 cm (0,1 m) isolering på mantelplåten. Detta minskar risk för brandspridning p.g.a. värmepåverkan avsevärt.

## Isolering med stenu

En kostnadseffektiv åtgärd kan vara att den hotade cisternen isoleras med t.ex. stenu för att skydda den mot värmestrålning. Även enkla metallkonstruktioner med uppgift att fungera som strålskärmar kan vara ett enkelt och kostnadseffektivt alternativ, se avsnitt "Strålskärmar" nedan.

För att isolering skall ha betydelse vid brand skall den vara obrännbar exempelvis stenu, eller lättbetong som motstår temperaturer på +600°C eller däröver. Med Drivkraft Sveriges beräkningsprogram kan man prova sig fram genom att modellera med tjocklek på isolering med stenu. Drivkraft Sveriges beräkningsprogram har som standardvärde endast isolationsvärden inlagt som avser isolationsmaterialet "stenu".

## Brandskyddsfärg

En utsatt cistern kan målas i brandskyddsfärg för att skydda mot värmestrålning. Brandskyddsfärg är vanligen dyrare än isolering med stenu. Målning med brandskyddsfärg är i nuläget (2016) inte ett brandskyddssystem som provats vid cisternbränder. Om färgens isolerande förmåga omräknas till motsvarande tjocklek av stenu kan detta värde användas i Drivkraft Sveriges beräkningsprogram för utvärdering av skyddseffekten.

## Strålningsskärmar

Strålningsskärmar i form av plåtar, eller murar eller skärmar med värmeisolerande material (ej lättantändligt, bör klara minst 600°C), kan vara lämpliga i vissa fall.

Strålskärmar skall vara utformade i sådant material att de inte deformeras av värme- eller tryckvägspåverkan och därigenom förlorar sin skyddsfunktion. Strålskärmar monteras mot de riktningar där risk för värmestrålning vid brand kan antas förekomma. Som skärmar kan t.ex. brandjalousier användas, som kan fällas ned i händelse av brand. Det går även att konstruera fasta väggar i förbindelse till cisternerna som skydd mot värmestrålning. Isolering- och strålningsskärmar används främst som komplement till mobila kylningslösningar.

## Uppdelning av befintlig invallning

En gemensam invallningskonstruktion för flera cisterner kan delas så att brandspridning genom direkt flampåverkan inte uppstår eller att värmestrålningens påverkan begränsas. Se Beräkningsfall 2 föregående sida.

## Expanderat glas i invallning

I vissa fall kan det innebära fördelar med att invallning delvis fylls med expanderat glas för att därmed minska avångning vid utsläpp samt värmestrålning från invallningsbrand.

Metoden har dock bedömts ha praktiska och operativa nackdelar för depåverksamheten med invallning, t.ex. svårigheter rengöra och underhålla och kontrollera sprickbildning inuti invallningen, eller vid underhåll av ventiler och flänsar, rörledningar o.s.v. inuti invallningen. Dessutom kan problem uppstå med att dränera regn och smältvatten ifrån invallningen.

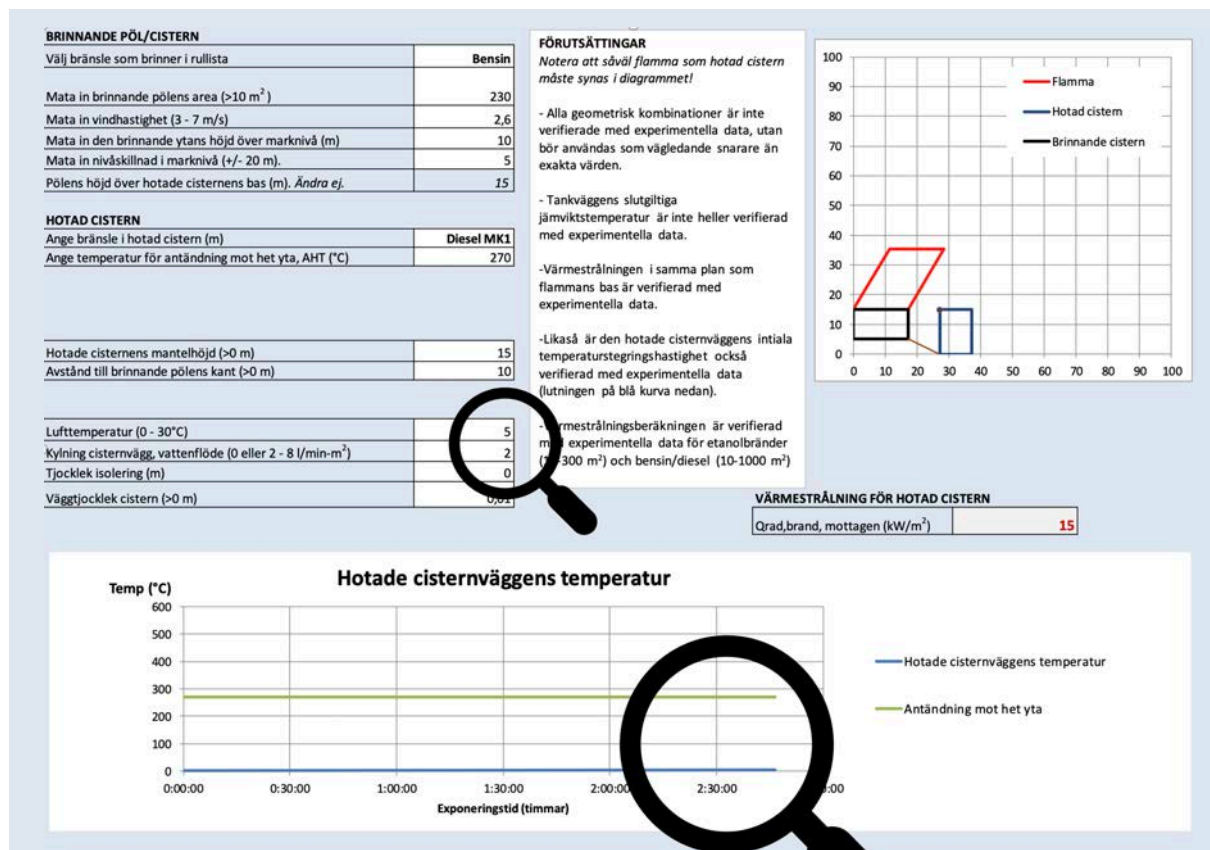


Bild 29. Kylning ansätts i Drivkraft Sveriges beräkningsprogram.

## 9.2.2 Aktiva skadebegränsande åtgärder – Kylning av cisterner

Grundprincipen för kylning är från rent fysikalisk synvinkel att vatten påförs en het yta (cisternmanteln, taket) som då kyls genom den avdunstning som uppkommer på manteln. Manteln kyls genom att vattnet förångas och därigenom tar upp en del av den utstrålade värmeenergin från branden, och förhindrar/fördröjer temperaturstegring.

Avståndet mellan brinnande och hotad cistern är en avgörande faktor för kylbehovet. En cisternbrand kan avge betydande värmeenergiflöden ( $\text{kW/m}^2$ ) mot ett objekt som ligger i dess omedelbara närhet.

Mängden kylvatten som behöver påföras cisternmanteln kan också variera beroende på den lösning som valts (mobilt eller fast system). Generellt gäller att fasta system kräver mindre vatten för att kyla samma yta eftersom munstyckena fördelar vattnet på ett effektivt sätt. Avståndet mellan cisternerna och den cistern som brinner samt konfiguration av cisternerna sinsemellan på depån, liksom förekomst av ev. isolering av mantelytan, är ytterligare faktorer som kan spela in på kylvattenbehovet av den hotade cisternen. Vissa korrigeringar av kylvattenflödet kan behövas vid dimensionering p.g.a. avdunstning samt förluster vid påföring vid vissa vindriktningar.

Bilden visar när kylning ansätts på en cistern. Om kylning antas kunna påbörjas innan tid för AHT uppnås, görs en ny beräkning där raden "kylning cisternvägg" ifylls i Drivkraft Sveriges beräkningsprogram. Genom flera efter varandra utförda beräkningar ("gaffling") med varierande flöden, kan ett kylbehov uppskattas. Vid kylning av cisterner med mobil utrustning används vanligen en dimensionerande vattentäthet på  $2 \text{ l/m}^{2*}$  min. Om fasta system används för kylning för aktuella vattentätheter, skall värden enligt en standard användas. Se avsnitt "Fast vattenkylsystem" nedan.

Behövs ytterligare mobil kylningskapacitet får man anta fler (strålkanon-)enheter. En ny beräkning görs på cistern med dessa förutsättningar, i raden för kylvattenflödet i Drivkraft Sveriges beräkningsprogram fylls nu i med siffran 2 (liter/minut och  $\text{m}^2$ ).

Beräkningsverktyget visar att axlarna inte kommer att korsas varandra med den kylning som kan uppnås i exemplet (se fig. ovan).

### Fast vattenkylsystem

Ett fast vattenkylsystem kan installeras som aktiveras manuellt eller automatiskt innan cisternplåten når den kritiska temperaturen för antändning.

En fast installation har fördelen att snabbt kunna sättas igång samt att vattenbegjutningen kan konstrueras med munstycken där vattnet fördelas på en stor del av cisternmantelns yta och tak. Med en fast installation kan bättre åtkomlighet mellan cisterner uppnås inom en cisterngrupp

där en mobil kylkanon av utrymmesskäl kan ha svårt att nå fram eller få plats. Fasta installationer bör uppfylla standards NFPA 15 med tillägget API RP2030, eller CEN/TS 14816 för att funktionen ska anses vara tekniskt säkerställd.

En nackdel med fasta installationer är dels att en fast installation kan riskera att skadas av explosionskrafterna direkt eller indirekt vid ev. tändning av explosiva ångor i tanktopp och göra skyddsinstallationen obrukbar, dels är kostnaderna för installationerna (fasta ledningsgator, ledningar, pumpar, ventiler o.s.v.) oftast mycket höga. Även underhållskostnaderna kan vara höga, i varje fall om systemet är föråldrat. Sådana system behöver även fortlöpande underhåll och provning. Det är därför inte självklart att just en fast installation alltid är det säkerhetsmässigt bästa alternativet för alla cisterner, eller mer ändamålsenligt jämfört med en mobil lösning, i vart fall inte om ett mobilt system dimensionerats på ett riktigt sätt.

### Stationära system

Med stationära system avses system som är avsedda för specifika ytor, t.ex. fasta kylsystem.



Källa: Johnny Nielsen, Inter Terminals.

Bild 30. Fasta kylsystem på cisterner.  
Fast kylinstallation på Inter Terminals depå i Göteborg.

### Semifasta kylsystem

Ett alternativ till fast kylsystem är ett semifast system som den lokala räddningstjänsten kan koppla upp sig mot och trycksätta. Anslutningar på semifasta system ska placeras på säkert avstånd från branden och ska kunna användas innan risk för brandspridning föreligger.

### Mobila kylkanoner

Mobila kylkanoner är ett flexibelt och kostnadseffektivt alternativ för att kyla den hotade cisternen innan risk för brandspridning föreligger.

Mobila enheter har fördelen att vattenkanonerna kan flyttas från en plats till en annan på samma depå. Detta innebär dock att personal måste närma sig branden för att kunna placera och rikta vattenpåföringen vilket kan placera dem inom en riskzon under en kortare period. Med en kylkanon kan det av utrymmesskäl vara svårt att kyla cisterner i mitten av en cisterngrupp p.g.a. av att en brinnande cistern skymms av en annan cistern. Tiden

innan kylning kan startas ökar också i jämförelse med en fast installation.

Mobila enheter kräver också en god teknik för riktning av vattenstrålen.

En fördel med mobila enheter är att de är mindre sårbara för skador från t.ex. explosioner på cisternens topp, eller från nedfallande rördelar, cisternplåtar o.s.v. Mobila enheter medför också väsentligt lägre kostnader att anskaffa, driva och underhålla. Utvecklingen internationellt går numer mot att mobila system används i allt större utsträckning för såväl brandsläcknings- som kyländamål.



Bild 31. Mobil kylkanon Inter Terminals depå i Södertälje



Bild 32: Courtesy to Dr Niall Ramsden, LASTFIRE Group. Fotografi från Buncefield branden december 2005. Bilden visar en förstörd fast brandpumpsinstallation som förstördes vid en explosionen och sedan blev obrukbar i den efterföljande branden.

### 9.3 Kylplaner – Exempel

För att effektivt planera för kylningsaktiviteter på en depå kan en kylplan med fördel utarbetas. Kylplanen kan exempelvis innehålla en förteckning över tillgänglig fast och mobil utrustning, möjliga utrustningskonfigurationer, vattenförsörjning, lämpliga uppställningsplatser etc. Kylplanen bör göras tydlig och enkel att läsa med hjälp av färgkoder och standardiserade symboler, se exempel nedan.

HALMSTAD BrandförvarOLJE

## KYLNINGSPÅN CISTERÑBRAND

Kylning kan ske med antingen hjulburen eller markbunden kanon.

Kapacitet hjulburen kanon är 1800 l/m vid 7 bar (70 mvp).  
Hjulburen kanon skall alltid matas med fyra slangledningar (76 mm).

Kapacitet markbunden kanon är 1000 l/m vid 6 bar (60 mvp).

Använd i första hand släckbilar och motorsprutor klass 3 för kylning. Vattenförsörjningen till släckbilarna sker lämpligen från brandpostnät eller brandvattenledningen. Detta är en lämplig uppgift för deltidskärerna.

Även vatten /skumenerheten kan användas för kylning.

Max 200m 76 slang mellan pump och hjulburen kanon.  
Max 150 m 76 slang mellan pump och markbunden kanon.

Exempel på kylning av A-E cistern.

**A** Minst 1300 l/m.

Ex. Två markbundna kanoner, ger 2000 l/min

**B** Minst 2300 l/m.

Ex. En hjulburen och en markbunden kanon ger 2800 l/min

Det går givetvis att mixa hjulburna och markbundna kanoner bara man uppnår de vattenflöden som krävs för kylning till den aktuella cistern.

Monday 8-11-17

Bild 33. Exempel på kylplan.

HALMSTAD BrandförvarOLJE

## KYLNINGSPÅN CISTERÑBRAND

**C** Minst 2600 l/m.

Ex. En hjulburen och en markbunden kanon ger 2800 l/min

**D** Minst 4300 l/m.

Ex. Två hjulburna och en markbunden kanon ger 4600 l/min

**E** Minst 4500 l/m.

Ex. Två hjulburna och en markbunden kanon ger 4600 l/min

Det går givetvis att mixa hjulburna och markbundna kanoner bara man uppnår de vattenflöden som krävs för kylning till den aktuella cistern.

Monday 8-11-17

Bild 34. Exempel på kylplan.

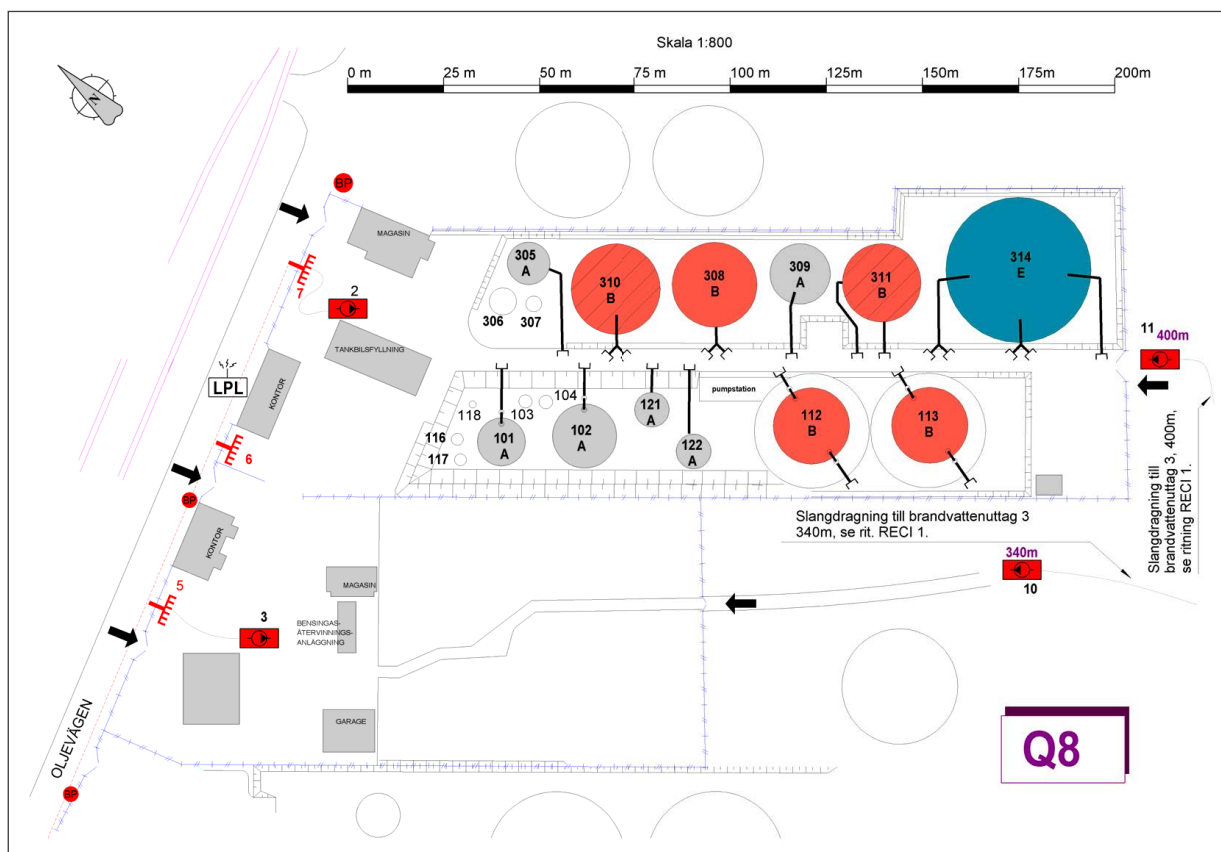


Bild 35. Exempel på kylplan.

Kylbehovet kan behöva klargöras i en mer systematisk kartläggning i samråd med räddningstjänsten. Drivkraft Sveriges beräkningsprogram kan användas för att bedöma kylbehov av cisterner och även strålning mot platser inom området. Dessa beräkningar kan då användas för att bedöma lämpliga platser för etablering av utrustning och personal.

#### Utrustning för kylning av cisterner på depåer – grunder för vägval

Enligt erfarenheter från depåbränder och explosioner på depåer i olika delar av världen t.ex. Buncefieldbranden 2005 m.fl., så kan brandvattenledningar skadas i samband med att cisterner börjar brinna. Det kan uppstå genom att t.ex. cisterntak flyger av, landar på matarledningarna för kylvatten eller pumpinstallationer som förstörs och därmed inte längre kan användas på det avsedda sättet.

Mobila kylutrustningar kan i det hänseendet ge större tillgänglighet och flexibilitet vid kylinsats, eftersom skaderisken för utrustningens tillgänglighet i skarpt läge inte på samma sätt är exponerad för explosioner eller nedfallande metallkonstruktioner. Detta resonemang om mobila kylutrustningar bygger givetvis i sin tur på förutsättningen att tillgång till vatten finns, att det också finns tillräckligt med brandvattenledningar att ansluta slangar till för den mobila utrustningen o.s.v.

Drivkraft Sverige anser därför att det är en sund riskhanteringsfilosofi att överväga båda möjligheterna med antingen fasta skyddssystem eller mobila systemlösningar. Fasta kylsystem-installationer är inte de enda godtagbara alternativ som är möjliga i depåer med återopande av LSO 2 kap. 4§. Det finns för- och nackdelar med såväl fasta som mobila system. Skaderisken på fasta kylsystem vid explosioner eller bränder kan tyvärr inte uteslutas enligt flerfaldiga erfarenheter från verkliga bränder på depåer. Mobil utrustning kan er hålla en fullgod skyddseffekt istället för fasta installationer, med korrekt dimensionerade mobila kylenheter. Räddningstjänstens personal kan tas i anspråk för andra uppgifter vid en brand i en oljedepå. Livräddning av personer kommer som ett exempel alltid att prioriteras framför kylning vid cisternbrand på en depå.

Tillgänglighetsproblematiken för såväl räddningstjänstpersonal som depåanställd personal är en ständigt återkommande fråga. Det senare kan däremot kräva någon form av organisation och planläggning för kylning på depån liksom korrekt dimensionerad kylutrustning (mobila såväl som fasta system).

Sårbarheten i och med användning av ett fasta kylsystem på en eller flera cisterner, är med andra ord ytterligare en aspekt och en riskfaktor ytterligare att ta in i tillgänglighets- och riskhanteringsproblematiken.

### Proportionalitetsprincipen

Kommunerna har en lagstadgad skyldighet enligt Lagen om Skydd mot Olyckor (SFS 2003:778) Kap. 3, en tydlig skyldighet att genomföra räddningsinsatser när det uppfyller kravet på att insatsen handlar om räddningstjänst. Kommunen skall enligt LSO i ett handlingsprogram redovisa sin förmåga och de resurser man har, samt avser att skaffa sig. Denna förmåga skall enligt samma lags (LSOs) intentioner svara mot det behov som finns d.v.s. mot bakgrund av de risker som finns i den enskilda kommunen.

Verksamhetsutövare som bedriver s.k. "Farlig verksamhet" är skyldiga enligt LSO 2 kap. 4§ investera i beredskapsåtgärder i skälighets omfattning.

Investeringar som syftar till endera miljöförbättrande eller säkerhetshöjande åtgärder skall alltid vägas mot den bedömda nytta som uppnås i förhållande till den kostnad som uppkommer vid genomförandet av en viss åtgärd. Detta brukar i lagstiftningen benämnas "skälighetsregeln", eller "proportionalitetsprincipen". Krav på utrustning m.m. i "skälighets omfattning" (LSO 2 kap. 4§ m.fl.) bör därför också gälla för kylproblematiken och val av den lösning som är rimlig och ändamålsenlig för användning på depåer. Samma principiella resonemang utifrån skälighetsregeln återfinns t.ex. i Miljöbalken (kap. 7), där krav på avvägning av skäligheten för kostnaden av en miljöåtgärd skall vägas mot den uppnådda miljönyttan. Samma princip bör tillämpas även för kylinstallationer, i detta sammanhang betyder det att kostnaden för kylinstallationen alltid måste vägas mot den nytta som det valda skyddssystemet förväntas kunna ge.

Enligt en internationellt gjord sammanställning av frekvenser för cisternbränder med depåcisternstorlek (LASTFIRE Incident Survey, ref. 12) är frekvensen för fullt utvecklad cisternbrand på depå låg, ca  $3 \times 10^{-5}$ /år (motsvarar 1 gång per 33 000 år). Den frekvensen, där risken i riskanalyssammanhang är att betrakta som låg, är baserad på en internationell sammanställning av cisternbränder och dess orsaker av LASTFIRE-organisationen. Sammanställningen av incidenter med brandorsaker, är en statistisk sammanställning samt beräknade frekvenser m.m. från cisternbränder runtom i världen m.fl. incidenter. Sammanställningen av brandorsaker avser rapporter från 164 anläggningar och 2 420 cisterner i 36 länder, motsvarande 33 909 tankår.

LASTFIRE är en internationell expertorganisation avseende brandskydd med bl.a. brandexperter från bl.a. oljebolag ifrån hela världen, försäkringsgivare, släckmedelsleverantörer etc. Enligt LASTFIRE rapporten är det osannolikt att värmepåverkan ensamt tänder en intelligande cistern förrän efter flera timmar, såvida inte vätskans begynnelsekokpunkt ligger nära omgivningstemperaturen.



# 10 REFERENSER

1. Planeringsunderlag för kylning. FoU Rapport Räddningsverket Karlstad, 2000, Måns Krook och Bengt Malmberg Malmö Brandkår. ISBN 91-7253-052-9.
2. Brandskydd i oljedepå – Rekommendation (2000). Räddningsverket i Karlstad. Beställningsnummer R49-216/03, 2003 års utgåva.
3. Tank Fires. Henry Persson; Review of fire incidents 1951-2003. Brandforsk Project 513-021.
4. ETANKFIRE – Large scale burning behaviour of ethanol fuels. Johan Sjöström, Glenn Appel, Francine Amon, Henry Persson. SP Report 2013:02. ISBN 978-91-87017-85-8 ISSN 0284-5172. Borås, Sweden, 2013.
5. NUREG FDT. Nuclear Regulatory Commission. Office of Nuclear Reactor Regulation Washington, DC 20555-0001. October 2004, U.S.A. Fire Dynamics Tools (FDT's). Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Program. Modellbeskrivning av synfaktor, strålvärme etc.
6. Rapport av Rasbash et al från 1956.
7. SP Rapport Nr 1996:06 Henry Persson m.fl. Påverkan från värmestrålning vid brand i cisternlager.
8. Reproduced from Fuel, 31 (1956) p. 94-97, by permission of the publishers, Butterworth & Co. (Publishers) Ltd. ©
9. Pool Fire accident in and above ground LFO tank storage: Thermal analysis, A. Rebec, P. Plešec, J. Kolšek. ZAG-Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, Fire Laboratory and Fire Engineering, Dimičeva 12, SI-1000 Ljubljana, Slovenia.
10. A study of storage tank accidents, Journal of Loss Prevention in the Process Industries No. 19 (2006) 51-59). Sammanställning med procentuell fördelning av tändorsaker till kända depåbränder.
11. Loughbury University, Institutional Repository. Fires in large atmospheric storage tanks and their effect on adjacent tanks. Dr. Khalid Mansour Thesis, 2012. Sid 50 m.fl. /av 383/). Rapporten beskriver mekanismer för brandspridning på depåcisterner.  
  
LASTFIRE Incident Survey, augusti 2012. Sid 29 pkt 4.4.2. Sammanställning av incidenter med brandorsaker, statistisk sammanställning samt felfrekvenser m.m. från cisternbränder runtom i världen m.fl. incidenter. Sammanställningen avser rapporter från 164 anläggningar och 2.420 cisterner i 36 länder, motsvarande 33.909 tankår.

LASTFIRE är en internationell expertorganisation med bl.a. brandexperter från bl.a. oljeindustrin från oljebolag ifrån hela världen, försäkringsgivare, släckmedelsleverantörer etc.

Enligt LASTFIRE rapporten är det osannolikt att värmepåverkan ensamt tänder en intilliggande cistern förrän efter flera timmar, såvida inte vätskans begynnelsekokpunkt ligger nära omgivningstemperaturen.

12. SS EN ISO 28300:2008. Punkten 4.4.2. "Emergency venting", a-g.
13. Kontroll av beräkningsprogram har gjorts via litteraturjämförelser, jämförelse med mätvärden från etanolbrinnprov, beräkning med PHAST m.fl. Tomas Lackman ÅF Infrastructure, m.fl.
14. Beskrivning av olika grader av värmeeffektpåverkan, med referenser.

1 kW/m <sup>2</sup>	Oskyddad hud kan utsättas obegränsad tid utan smärta. Fig 2.4 i kap 2.6 CPR 16E.
2,6 kW/m <sup>2</sup>	Oskyddad hud kan utsättas i 30 s utan smärta. Fig 2.4 i 1 kap 2.6 CPR 16E.
6 kW/m <sup>2</sup>	15-30 min. arbete möjligt med branddräkt och tryckluftapparat. Van Wechem, Paul, "Pre-Incident Planning", Industrial Fire Journal Conference, Singapore, 1998.
7 kW/m <sup>2</sup>	3-7 min stillastående arbete möjligt med branddräkt och tryckluftapparat Persson, Henry, "Basutrustning för skumsläckning-Försöksresultat och rekommendationer som underlag för dimensionering och utförande", SP rapport 1990:36, 1990.
8 kW/m <sup>2</sup>	Anses normalt sett inte utgöra någon fara för utrustning och sannolikheten för brandspridning är liten "Fire Precautions at Petroleum Refineries and Bulk Storage Installations - Model Code of Safe Practice, Part 19", The Institute of Petroleum, 1993.
12,6 kW/m <sup>2</sup>	Kylningsbehov finns normalt inte om exponeringstiden understiger 1 tim. Van Wechem, Paul, "Pre-Incident Planning", Industrial Fire Journal Conference, Singapore, 1998.
15 kW/m <sup>2</sup>	2 min stillastående arbete möjligt med branddräkt och tryckluftapparat. Brandslang utan flöde skadas. Persson, Henry, "Basutrustning för skumsläckning - Försöksresultat och rekommendationer som underlag för dimensionering och utförande", SP rapport 1990:36,1990.
20 kW/m <sup>2</sup>	3:e gradens brännskada naken hud efter 6 s (Fig 2.3 i 1 kap 2.6 CPR 16E). Brandslang utan flöde förkolnas. Persson, Henry, "Basutrustning för skumsläckning - Försöksresultat och rekommendationer som underlag för dimensionering och utförande", SP rapport 1990:36,1990.
32 kW/m <sup>2</sup>	Risk för mekaniskt brott i stålkonstruktioner. Van Wechem, Paul, "Pre-Incident Planning", Industrial Fire Journal Conference, Singapore, 1998.
15. Emil Hallberg, Johan Sjöström, Fredrik Kahl (2019) "Antändning av heptan, E85, bensin och diesel mot heta ytor", RISE Rapport 2019:66

# Appendix

## BILAGA 1.

Redovisning av beräkningsprogrammets teoretisk grund

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>1. Bakgrund och syfte</b> .....	<b>37</b>
<b>2. Beräkning av värmestrålning</b> .....	<b>38</b>
2.1 Pölbrand .....	39
2.2 Beräkning av värmestrålning vid en omslutande brand .....	41
3.1 Beräkning av vinkelkoefficienten .....	42
<b>3. Beräkning av mottagen värmestrålning på ett avstånd från pölbranden</b> .....	<b>42</b>
<b>4. Värmebalansberäkning i hotad cistern</b> .....	<b>44</b>
4.1 Mottagen värme .....	45
4.2 Värmetransporter .....	45
4.2.1 Konvektion mot omgivande luft .....	45
4.2.2 Utstrålning .....	45
4.2.4 Värmeledning genom isolering .....	46
4.2.5 Värmestrålning .....	46
4.3 Dynamisk simuleringsmodell .....	46
4.4 Numerisk analys .....	47
<b>5. Osäkerheter</b> .....	<b>48</b>
<b>6. Referenser</b> .....	<b>50</b>



# 1 BAKGRUND OCH SYFTE

Vid ett brandprov i Borlänge 2012 med Etanol visades att större etanolbränder avger relativt sett betydligt starkare värmeavgivning jämfört med motsvarande brand i bensin. Drivkraft Sverige har också ett behov av likvärdiga bedömningsgrunder i branschen för att fastställa kylbehov av cisterner.

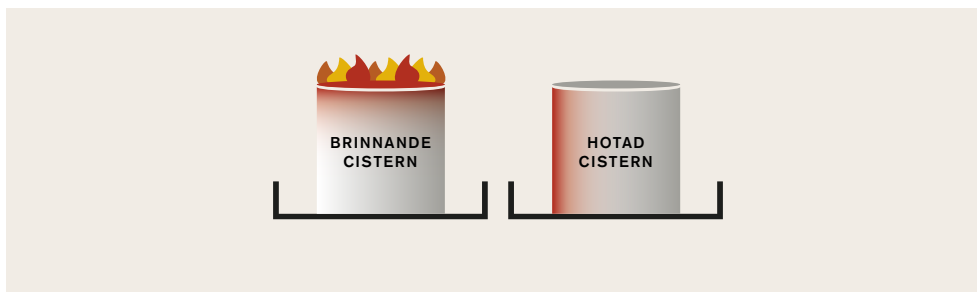
Syftet med detta uppdrag har varit att utarbeta ett användarvänligt beräkningsverktyg baserat på beprövad och vetenskapligt accepterade beräkningsmetodiker. Verktöget skall kunna användas av t.ex. platschef, depåchef, eller annan verksamhetsansvarig på en depå, samt i förekommande fall de som har behov av att bedöma om det finns ett behov av kylning eller andra åtgärder för att förhindra brandspridning. Beräkningsverktyget består av såväl förinställda värden som variabla värden.

Verktöget kan användas för identifiering och bedömning av kylbehov på depåcisterner av tre specifika och representativa typfall för brand på depå: brand i cistern som hotar närliggande cistern, invallningsbrand som ger direktpåverkan av flammor på hotad cistern och invallningsbrand med värmepåverkan av annan hotad cistern utanför invallningen

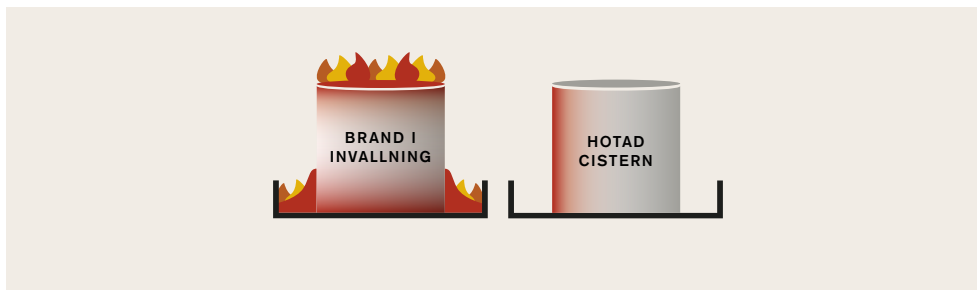
# 2 BERÄKNING AV VÄRMESTRÅLNING

Värmestrålning som den utsatta cisternen exponeras för beräknas för två fall, dels pölbrand på avstånd Fig 1 och 2 - dels fallet med en omslutande brand runt cisternen, Fig 3

Värmestrålning som den utsatta cisternen exponeras för beräknas för två fall, dels pölbrand på avstånd Fig 1 och 2 - dels fallet med en omslutande brand runt cisternen, Fig 3.



Figur 1. Brand i cistern som hotar närliggande cistern.



Figur 2. Invallningsbrand med värmepåverkan av annan hotad cistern utanför invallningen Rapport II Page 4 (13)



Figur 3. Invallningsbrand som ger direktpåverkan av flammor på hotad cistern.

## 2.1 Pölbrand

För en pölbrand beräknas den utstrålande värmen som en funktion av total producerad brandeffekt, andelen som avges som värmestrålning och flammans storlek. Ingångsdata för de tre olika bränslegrupperna är redovisade i Tabell 1.

Beräkning av värmestrålning från några olika bränslen återges i Tabell 1.

Tabell 1. Värmeeffekt

Bränsle	Förbränningsvärme	Brinnhastighet (kg/m <sup>2</sup> s) mb
Bensin	44 MJ/kg	0,055 [1]
Diesel	44 MJ/kg	0,045 [2]
E85	27,3 MJ/kg <sup>3</sup>	0,074 [2]

Lutande flammans höjd ( $H_f$ ) i meter beräknas enl Thomas (1963), eq [16.17.11] s.1258 vol. 1 i Lees' Loss Prevention in the Process Industries ed. 4:

$$H_f = 55D(u^*)^{-0,21} \left( \frac{m_b}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0,67}$$

där

$$u^* = \frac{u_w}{\left( \frac{gm_b D}{\rho_a} \right)^{1/3}}$$

$u_w$  vindhastighet (m/s)

$g$  gravitationskonstant 9,81 m/s<sup>2</sup>

$m_b$  brinnhastighet (kg/m<sup>2</sup>s)

$D$  pöldiameter (m)

$\rho_a$  luftens densitet (1,2 kg/m<sup>3</sup>)

Flammans horisontella utsträckning beräknas enl:

$$L_f = \tan(\theta)H_f$$

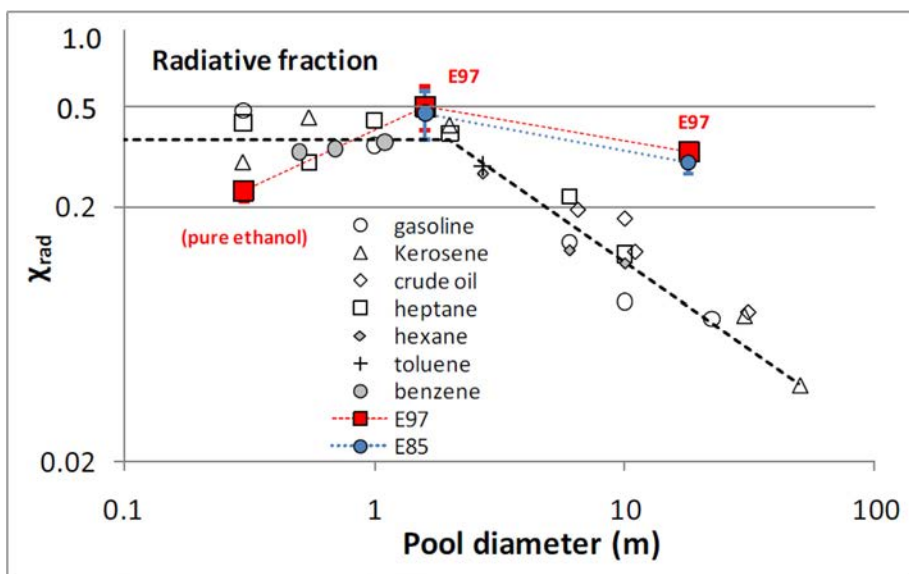
där flammans lutningsvinkel är:

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{1}{u^*} \right)$$

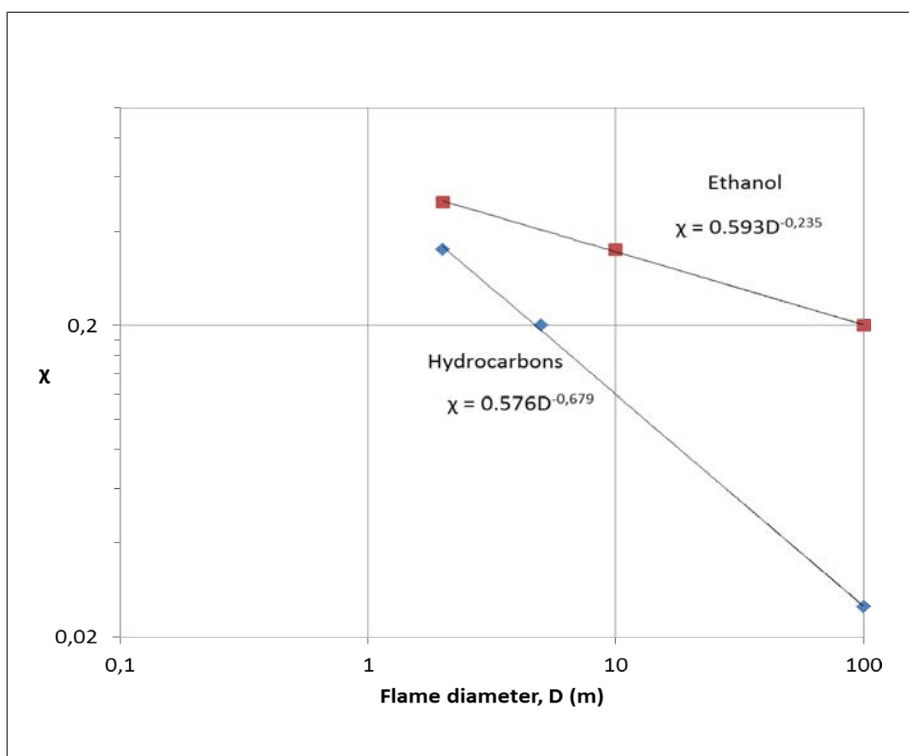
Andelen av den utvecklade värmen som avges i form av strålning beror på pölbrandens storlek. En beräkning av denna har härletts utifrån Figur 4 från SPs rapport [2]. En beräkning görs för kolväte- (bensin och diesel) respektive etanolbaserade bränslen se figur 5.

$$\chi_{Etanol} = 0,5793D^{-0,235}$$

$$\chi_{Kolväten} = 0,576D^{-0,679}$$



Figur 4. Andel av total energi som avges i form av strålning [2]



Figur 5. Andel av total energi som avges i form av strålning korrelation.



$Q_{rad}$  (MW) är den utstrålade totala energin för pölen:

$$Q_{rad} = \chi Q_{tot}$$

Den utstrålade effekten ( $Q_{rad,flam}$ , MW/m<sup>2</sup>) per yta på flammans blir på så sätt:

$$Q_{rad,flam} = \frac{Q_{rad}}{\pi DH} \text{ där}$$

$D$  - Pölbrandens diameter (m)

$H$  - Flammans längd (m)

## 2.2 Beräkning av värmestrålning vid en omslutande brand

För en omslutande brand (Fig 3.) har den mottagna värmestrålningen för den exponerade tanken beräknats som om den var utsatt för strålning från en flamma med temperaturen 1525 K [1].

Den mottagna strålningen beräknas i detta fall under antagandet av svartkroppsstrålning till:

$$Q_{rad,brand} = \sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

där

$Q_{rad,flam}$  - mottagen strålning W/m<sup>2</sup>

$T_1$  - flammans temperatur (K)

$T_2$  - tankväggens temperatur (K)

$\sigma$  - Boltzmanns konstant  $5,67 \times 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

Exempel

För en flamtemperatur av 1525 K och väggtemperatur av 400 K ger detta ett värmefflöde till exponerad cistern av ca 300 kW/m<sup>2</sup>.

# 3 BERÄKNING AV MOTTAGEN VÄRMESTRÅLNING PÅ ETT AVSTÅND FRÅN PÖLBRANDEN

Från en pölbrand på avstånd  $x$  (m) beräknas infallande värmestrålning enligt:

$$Q_{(rad,brand,mottagen)} = \tau F Q_{(rad,brand)}$$

där

$F$  - är en dimensionslös vinkelkoefficient som beräknas för en mottagande yta riktad mot branden som befinner sig på ett bestämt horisontellt avstånd från pölen, på en bestämd nivå ovanför den brinnande pölen i vindriktningen.

$\tau$  - är transmissionen genom luften som beräknas enligt [1]

$$\tau = 2,02(P_w X_s)^{-0,09}$$

$$P_w = 1013,25(RH)\exp\left(14,4114 - \frac{5328}{T_a}\right)$$

där

$T_a$  - Lufttemperaturen

$RH$  - relativa luftfuktigheten (%)

$X_s$  - avståndet till flammen

$P_w$  - vattenångans partialtryck

## 3.1 Beräkning av vinkelkoefficienten

För att kunna ta hänsyn till lutande flammor i kombination med olika topografier på depåer har en ekvation för bestämning av vinkelkoefficienter härletts.

I Figur 6, beräknas  $L_1$ ,  $H_b$  enligt

$$L_1 = \cos(\theta) (L_0 + h_0 \tan(\theta))$$

$$H_b = \sqrt{L_0^2 + h_0^2 - L_1^2}$$

Vinkelkoefficienten mellan det översta vänstra hörnet, närmast flammen, och flammen kan sedan beräknas med hjälp av superpositionsregeln:

$$F = F(H_a + H_b, L_1, D) - F(H_b, L_1, D)$$

där  $F(H,L,D)$  är vinkelkoefficienten för ett mål på marken på ett avstånd  $L$  från en vertikal flamma med höjden  $H$  och diametern  $D$ . Ekvationer för beräkning av  $F$  för vertikala flammor

finns i många fackböcker, t.ex. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (2002). Här används ekvationer enligt Beyler (2002):

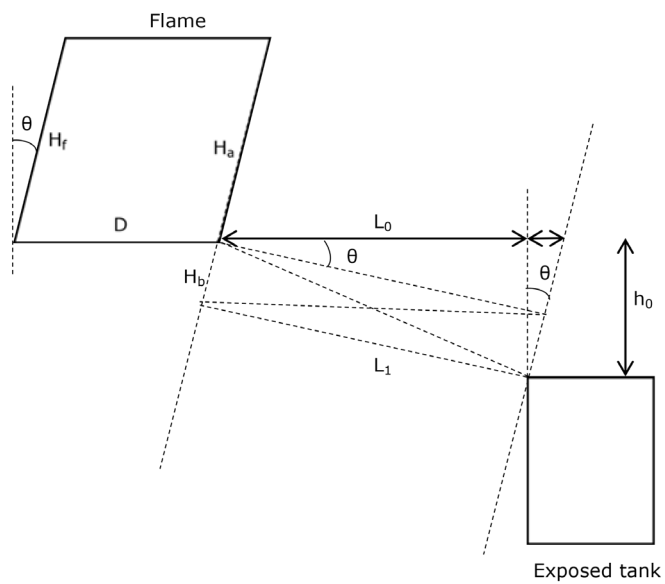
$$A = \frac{(S^2 + h^2 + 1)}{2S}$$

$$B = \frac{1 + S^2}{s}$$

$$S = \frac{2(L + \frac{D}{2})}{D}$$

$$h = \frac{2H}{D}$$

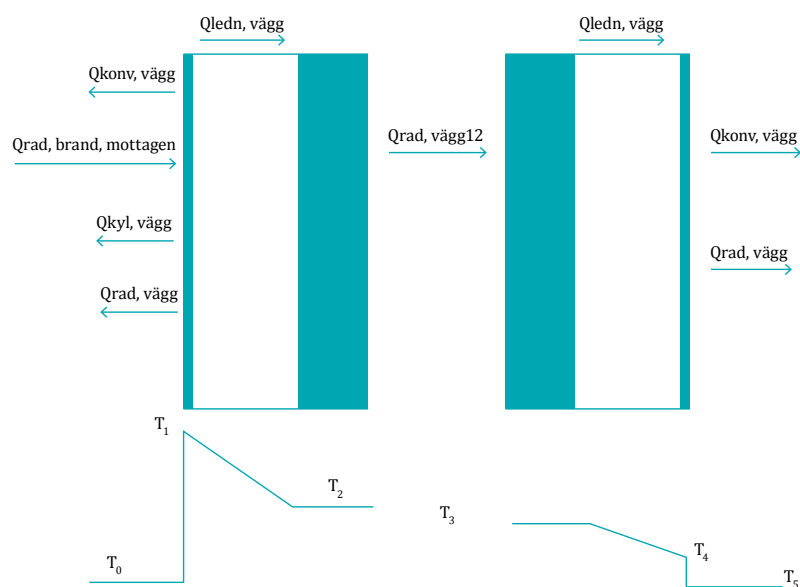
$$F = \sqrt{\left( \frac{B - \frac{1}{S}}{\pi\sqrt{B^2 - 1}} \cdot \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(B+1)(S-1)}{(B-1)(S+1)}} \right) - \frac{A - \frac{1}{S}}{\pi\sqrt{A^2 - 1}} \cdot \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}} \right) \right)^2 + \left( \frac{1}{\pi S} \tan^{-1} \left( \frac{h}{\sqrt{S^2 - 1}} \right) - \frac{h}{\pi S} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{S-1}{S+1}} \right) + \frac{Ah}{\pi S\sqrt{A^2 - 1}} \cdot \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}} \right) \right)^2}$$



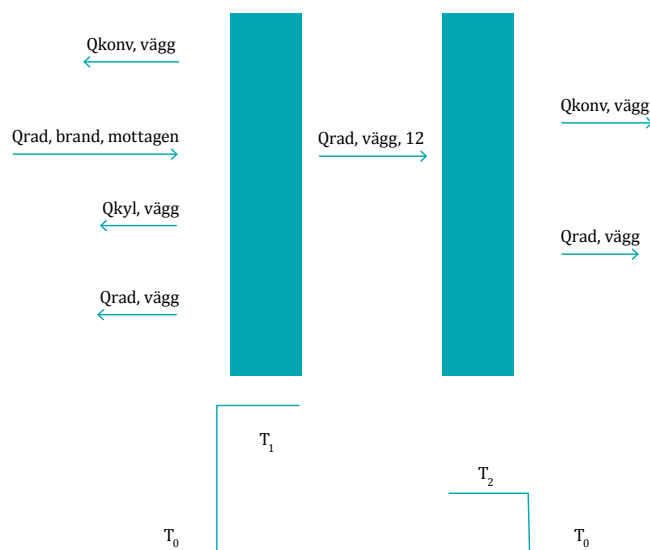
Figur 6. Bestämning av vinkelkoefficienter

# 4 VÄRMEBALANSBERÄKNING I HOTAD CISTERN

Den hotade cisternen bedöms i de flesta fall bli hetast i den övre delen av cisternväggen som vetter emot branden. I denna del kan värmebalansen ställas upp enligt följande se Figur 7 och 8.



Figur 7.  $T_2$  är den högsta temp som brännbara ångor blir utsatta för inne i cisternen. Med isolering



Figur 8.  $T_1$  är den högsta temp som brännbara ångor blir utsatta för inne i cisternen. Utan isolering

## 4.1 Mottagen värme

$Q_{rad,brand}$  har beräknats i tidigare avsnitt för fallen pölbrand respektive omslutande brand.

## 4.2 Värmetransporter

### 4.2.1 Konvektion mot omgivande luft

Omgivande luft kylar väggen och kan beräknas som konvektiv värmeöverföring enligt följande [2]:

$$Q_{konv,vägg,1} = \alpha(T_1 - T_0)$$
$$\alpha = 1,9T_0^{0,087} \sqrt{\frac{u}{x}}$$

där  $u$  (m/s) är vindhastigheten och  $x$  sträckan av den yta som värmeöverföringen sker över.

I det verkliga fallet kommer vindens kylande effekt av vinden vara kraftigast i samma position där värmestrålningen är kraftigast, dvs i hörnet mot den brinnande cisternen. Här ansetts  $x$  till 1 meter. Detta antagande bedöms konservativt eftersom själva hörnet av cisternen egentligen är mindre. Längre bort från hörnet blir kylningen av konvektion sämre, men samtidigt blir då också värmestrålningen svagare eftersom avståndet ökar och ytorna inte är riktade mot flamman på samma sätt som i hörnet.

Denna formel kan även appliceras på den skyddade cisternväggens kylning,  $Q_{konv,vägg,2}$

### 4.2.2 Utstrålning

Heta ytor avger värme i form av utstrålning. Såväl den exponerade cisternväggen som den på skuggsidan kommer avge värmestrålning. Utstrålningen kan enligt Stefan-Boltzmanns lag beräknas som:

$$Q_{konv,vägg} = \epsilon \sigma T^4$$

där  $T$  är ytans temperatur i Kelvin och  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

För svartkroppstrålande kroppar (vilket är konservativt då mottagen strålning från branden kommer vara större än avgiven) är  $\epsilon=1$ .

### 4.2.3 Kylning

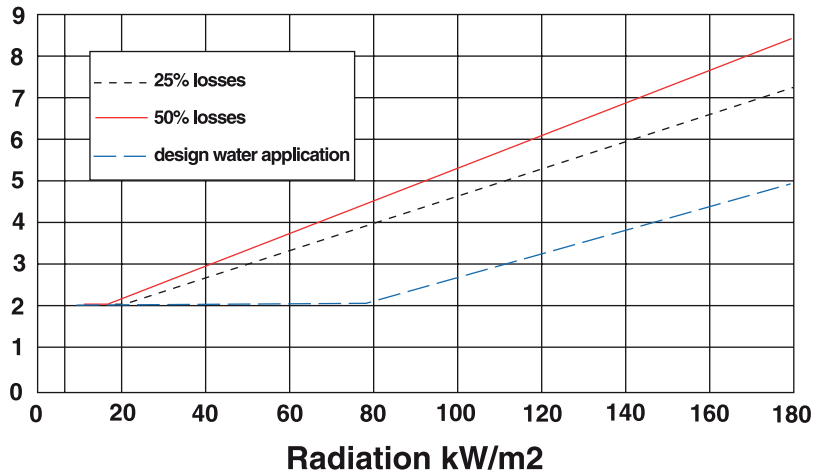
För flöden  $>2 \text{ l}/(\text{min m}^2)$  beräknas kyleffekten av sprinkling beräknas ungefärligt enligt

$$Q_{kyl,vägg,1} = 1000 (\text{vattenflöde} \times 20 - 20)$$

Där vattenflödet anges i  $\text{l}/(\text{min m}^2)$  och kyleffekten i  $\text{W}/\text{m}^2$ .

Ekvationen har härletts som det mest konservativa fallet i Figur 9 ur Brandskydd i Oljedepå [7] med 50% förluster.

## SPRAY WATER REQUIREMENTS



Figur 9. Kylning av exponerad cistern med kylvatten [7].

### 4.2.4 Värmeledning genom isolering

Värmeledningen genom en eventuell isolering av tanken beräknas enligt:

$$Q_{\text{ledn, vägg, 1}} = \frac{\delta(T_1 - T_2)}{l}$$

där

$Q_{\text{konv, vägg, 1}}$  - anges i  $W/m^2$

$\delta$  - väggens värmeledningsförmåga  $0,05 W/m^{\circ}C$  för mineralull [6]

$l$  - tjocklek (m)

### 4.2.5 Värmestrålning

Värmestrålningen från den hotade cisternväggen till den skyddade beräknas enligt följande:

$$Q_{\text{rad, vägg, 1-2}} = \sigma F_{23}(T_2^4 - T_3^4)$$

där

$\sigma$  - Boltzmanns konstant  $5,67 \times 10^{-8} W/(m^2K^4)$

$Q_{\text{rad, vägg, 1-2}}$  - anges i  $W/m^2$

$F_{23} = 1/(2/e - 1)$ , där  $e$  är emissionsfaktorn. Emissionsfaktorn varierar mellan 0,1 och 1 för olika ytor och sätts här till 0,5 för ytorna inne i cisternen, vilket ger  $F = 0,3$ .

## 4.3 Dynamisk simuleringsmodell

Temperaturen på respektive väggyta beräknas dynamiskt enligt följande:

$$\frac{dT_x}{dt} = \frac{\Delta Q_x}{l\rho C_p}$$

där

$l$  - väggens tjocklek (m)

$C_p$  - värmekapacitet  $J/kgK$

$\rho$  - densitet  $kg/m^3$

$$\Delta Q_1 = Q_{\text{rad, brand, mottagen}} - Q_{\text{ledn, vägg, 1}} - Q_{\text{konv, vägg, 1}} - Q_{\text{kyl, vägg, 1}} - Q_{\text{rad, vägg, 1}}$$

$$\Delta Q_2 = Q_{\text{ledn, vägg, 1}} - Q_{\text{rad, vägg, 1-2}}$$

$$\Delta Q_3 = Q_{\text{rad, vägg, 1-2}} - Q_{\text{ledn, vägg, 2}}$$

$$\Delta Q_4 = Q_{\text{ledn, vägg, 2}} - Q_{\text{konv, vägg, 2}} - Q_{\text{rad, vägg, 2}}$$

Utan isolering

$$\Delta Q_1 = Q_{\text{rad, brand, mottagen}} - Q_{\text{konv, vägg, 1}} - Q_{\text{kyl, vägg, 1}} - Q_{\text{rad, vägg, 1-2}} - Q_{\text{rad, vägg, 1}}$$

$$\Delta Q_2 = Q_{\text{rad, vägg, 1-2}} - Q_{\text{konv, vägg, 2}} - Q_{\text{rad, vägg, 2}}$$

#### 4.4 Numerisk analys

Simuleringen av brandfallet görs numeriskt i Drivkraft Sveriges beräkningsprogram mha Eulers metod för begynnelsevärdesproblem av första ordningen, dvs

$$T_x(t_0) = T_0$$

$$T_x(t_{n+1}) = T_{1...4}(t_n) + \Delta t \frac{\Delta Q_x(T_x(t_0))}{l_x \rho_x C_{p,x}}$$

där

$T_0$  -begynnelsestemperaturen

$t_n$  - tiden

$\Delta t$  - tidssteget i beräkningen (fn 10 s.)

# 5 OSÄKERHETER

För att säkerställa att värmebalansberäkningen är konservativ och inte underskattar uppvärmningen av tankväggen har några värmeöverföringsmekanismer bortförts. Här följer en bedömning av osäkerheten av dessa.

- Värmeledning i tankväggen från den varma sidan till den kalla sidan är inte med i beräkningen. Intuitivt vet man att värmeledning genom metall är långsam. Föreställ dig t.ex. att man svetsar i ena änden av ett 10 meter lång rör. Det blir inte speciellt varmt i den kalla änden av röret. Vid beräkning av värmeledningen genom tankväggen fås denna till mindre än 1000-del jämfört med den utstrålade effekten.
- Ingen konvektiv värmeöverföring antas ske inne i tanken. Detta antagande görs eftersom den varma luften inne i tanken kommer att ansamlas i toppen av tanken och på så sätt inte kunna kyla det översta hörnet av tankväggen.

För att bedöma osäkerheten i modellen har jämförelser med experimentella data gjorts enligt Tabell 2.

Det som inte kunnat verifieras med experimentella data är dels den jämviktstemperatur som uppnås på den hotade cisternväggen efter lång tids bestrålning samt värmestrålningsberäkningarna i olika rymdgeometrier. Dessa data bör därför användas med försiktighet.



Tabell 2. Jämförelse mot empiriska data och andra simuleringar

Experiment	Beräknat med Drivkraft Sverige-modellen	Kommentar
Gasoltank innehållande gasol (6 mm tjock ståltankvägg) utsatt för 43 kW/m <sup>2</sup> strålning gav 200°C (efter 2,6min); 300°C (5 min) [9]	200°C (efter 1,5 min); 470°C (5 min)	Eftersom gasoltanken i experimentet innehåller gasol åtgår en hel del värme till att förångas gasolen och höja trycket. Det kan förklara skillnaden i temperatur. Drivkraft Sverige-modellen är hursomhelst konservativ.
Pölbrand, D= 3 m, LFO, Värmestrålning vid vindstilla 6 m från pöl: 7,8 kW/m <sup>2</sup> [8]	8 kW/m <sup>2</sup> (Drivkraft Sveriges Beräkningsprogram 1,2 m/s och 6 m från pöl)	Modellerna stämmer bra överens
Pölbrand, D= 390 m <sup>2</sup> bensen, värme-strålning 20 m från pöl: 7,5 - 5 kW/m <sup>2</sup> [2]	7 kW/m <sup>2</sup> (Drivkraft Sverige Beräkningsprogram 2,6m/s och 20 m från pöl)	Modellerna stämmer bra överens
Uppvärmning av aluminiumdom pga pölbrand LFO, diameter 60 m, vind 5 m/s, avstånd 30 meter, max temperatur 275°C, tid till 200°C = ca 130 sekunder (Simulering) [8]	Maxtemperatur: 300°C, tid till 200°C = ca 90 sekunder, antagen aluminiumgodstjocklek 1,27 mm	Modellerna stämmer bra, temperaturstegringshastighet och jämviktstemperatur ger en god fingervisning av säkerhetsmarginalen. Godstjockleken på aluminiumdom avgörande för dynamiken.
Guttasjö försöken [11]:  30-35 kW/m <sup>2</sup> gav 300°C efter 5 min  20-25 kW/m <sup>2</sup> gav 250°C efter 5 min  11 kW/m <sup>2</sup> gav 100°C efter 5 min	33 kW/m <sup>2</sup> ger 300°C efter 6:00 min  23 kW/m <sup>2</sup> ger 250°C efter 7:10 min  11 kW/m <sup>2</sup> ger 100°C efter 5:30 min	Modellen visar bra överensstämmelse med Guttasjöförsöken. En osäkerhet är dock väggstjockleken eftersom den har betydelse för uppvärmningshastigheten.

# 6 REFERENSER

1. Lees, Loss Prevention in the Process Industries, 4th Edition, (2012)
2. Sjöström, Appel, Amon, Persson: ETANKFIRE - Large scale burning behaviour of Ethanol fuels, (2013)
3. NUREG 05.2\_Heat\_Flux\_Calculations\_Wind, Version 1805.0
4. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, (2002)
5. Ekroth, Granryd: Tillämpad termodynamik, KTH, Inst för Mekanisk värmeteori och kylteknik (1991)
6. Mörtstedt, Hellsten: Data och Diagram (1991)
7. Räddningsverket: Brandskydd i oljedepå - Rekommendation (2000)
8. A. Rebec, P. Plešec, J. Kolšek, Pool fire accident in an aboveground LFO tank storage: thermal analysis, Fire Safety Journal, Volume 67, July (2014), Pages 135-150, ISSN 0379-7112, <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.05.022>.
9. F. Heymes, L. Aprin, A.M. Birk, P. Slangen, J.B. Jarry, H. François, G. Dusserre, An experimental study of an LPG tank at low filling level heated by a remote wall fire, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 26, Issue 6, November 2013, Pages 1484-1491, ISSN 0950-4230, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2013.09.015>.
10. Mansour K., 2012, Fires in large atmospheric storage tanks and their effect on adjacent tanks. PhD Thesis, Loughborough University, UK
11. Persson H. och Persson B. *Påverkan av värmestrålning vid brand i cisternlager*. SP Rapport 1996:06

# Appendix

## BILAGA 2.

Temperatur för antändning mot en het yta inuti en cistern med brännbar atmosfär, som utsätts för värmestrålning från en intilliggande brand.

Bränder i cisternområden för brandfarlig vätska kan bli svårsläckta om en brand sprids till flera andra cisterner. I syfte att bedöma risken för brandspridning har Drivkraft Sverige utvecklat ett beräkningshjälpmedel för att uppskatta risken för brandspridning från en brinnande cistern till en annan cistern i närheten (Drivkraft Sverige, 2016).

Grunden för brandspridning i detta hjälpmedel har antagits vara att en brand kan spridas med värmestrålning som hettar upp tankväggen på intilliggande cisterner, och att detta kan antända en brännbar atmosfären på insidan i dessa. Brännbar atmosfär antas ha uppnåtts på grund av avgång av ångor från bränsle som ligger i kontakt med exponerad cisternvägg.

Avgörande för att uppskatta risken i detta hjälpmedel är den temperatur på exponerads tanks tankvägg, vid vilken det föreligger möjlighet för att antändning av innehållet inuti exponerad cistern.

I MSBs rekommendation Brandskydd i oljedepå från 2000 refereras till följande kriterier för antändning mot het yta:

- "Strålningsnivåer understigande  $8 \text{ kW/m}^2$  anses normalt sett inte utgöra någon fara för utrustning och sannolikheten för brandspridning är liten" baserat på uppgifter från The Institute of Petroleum (1993) och att beräkningar gjorts där  $8 \text{ kW/m}^2$  resp  $12,5 \text{ kW/m}^2$  ger en plåttemperatur på ca  $200\text{-}270^\circ\text{C}$  respektive  $260\text{-}360^\circ\text{C}$  efter 30 minuters exponering.
- Vidare nämns i MSBs rekommendation att något oljebolag använder strålningsnivån  $12,5 \text{ kW/m}^2$  som gräns för när en kylinsats av hotade objekt bör sättas in. Detta motsvarar enligt uppgift en jämnviktstemperatur på ca  $300^\circ\text{C}$  hos en fri stålyta som är isolerad på baksidan.

Här följer en sammanställning av använda bedömningsgrunder i Drivkraft Sveriges beräkningshjälpmedel.

## Antändning mot heta ytor

Självantändning av brännbara vätskor bestäms i tester där vätskan i sin helt är omsluten av samma temperatur. Vid antändning mot het yta är vätskan och dess ångor enbart delvis exponerad mot en yta med hög temperatur.

### Litteraturstudie

Det har visats att antändning mot heta ytor kan skilja sig mot självantändning, vilket har studerats av RISE (Emil Hallberg et al, 2019). Av deras rapport framgår att

- det i studier om bränsle/luft blandningar i olika stökiometrier på förvärmade varma metalliska ytor har visats att kolväten med låg molekylvikt har en antändningstemperatur mot heta ytor på 1.5-1.75 gånger AIT (Auto-Ignition Temperature, termisk tändpunkt) givet i Kelvin (Ungut & James, 2001).
- Vidare anges att Severy et al (1974) studerade droppar av bränsle på heta ytor i en sluten behållare och fann att antändning skedde på mycket högre temperaturer än AIT för följande ämnen: Bromsvätska (AIT=280-355, AHT =  $500^\circ$ ), diesel (AIT =220-320, AHT =  $539^\circ$ ), bensin (AIT =246-280, AHT =  $627^\circ\text{C}$ ), motorolja (AIT =260-370, AHT =  $420^\circ\text{C}$ ) och propan (AIT = 450, AHT  $\approx 775^\circ\text{C}$ ).
- De nämner även andra experiment utförda i mindre slutna förhållanden som visade på ännu högre temperaturer (LaPointe, et al., 2005) och omfattande studier av Colwell och Reza som visade AHT på  $612\text{-}638^\circ\text{C}$  för bensin och  $542\text{-}575^\circ\text{C}$  för diesel (Colwell & Reza, 2005).

Emil Hallberg et al (2019) konstaterar att gemensamma konsensusen av flera studier, varav bara några få är nämnda ovan, har lett till att det Amerikanska Petroleum Institutet förespråkar att heta ytor utgör en trolig antändningskälla för bränslen om de har en temperatur på minst 200 °C över AIT i stilla luft (API, 1991).

Emil Hallberg et al (2019) refererar till Babrauskas (2008) som anger att tre saker krävs för att antändning ska ske:

- (i) En yta måste ha en temperatur över AIT,
- (ii) Luft/bränsle blandningen måste vara inom brännbarhetsgränsen,
- (iii) den brännbara luft/bränsle blandningen måste vara nära den varma ytan tillräckligt länge så antändning kan ske. Tiden som gaser stannar när den heta ytan kallas uppehållstid (residence time).

I AIT tester så droppas bränsle in i en så kallad Setchkin flaska (ASTM, 2015) där ytorna alla har samma, konstanta, temperatur. Det vill säga att bränslet är omgivet av samma temperatur och därav är uppehållstiden oändlig. I en AHT (Antändning mot Het yta Temperatur) situation så är gasen inte omsluten av heta ytor utan även av markant svalare ytor och uppehållstiden är därför en faktor som är påverkad av flera aspekter beroende på situationen. Det kan vara ytans orientering (påverkar gasens lyftförmåga), gashastigheten, ytans storlek och den heta ytans utbredning.

Vid en sammanställning av egenskaperna hos brännbara vätskor framgår att AIT/termisk tändpunkt sjunker med kolkedjornas längd, för att sedan stabiliseras strax över 200°C, se Tabell 1.

Tabell 1. Termisk tändpunkt/AIT för kolväten (Hallberg, 2019)

	Metan	Etan	Propan	Butan	Pentan	Hexan	Heptan	Oktan	Nonan	Dekan
AIT (°C)	600	515	450	372	243	225	204	206	205	235

### Tester vid RISE

Syftet med testerna vid RISE (Emil Hallberg et al, 2019) var att undersöka antändning mot varma ytor inuti en stor bränsletank vilken blir upphettad av en intilliggande brinnande bränsletank. Det vill säga, denna situation skiljer sig ifrån de tester som gjorts där droppar av bränsle är droppade på en het yta. Istället så undersöktes situationen där en brännbar bränsle/luft blandning är instängd i en tunna där locket är uppvärmt medan resten av behållaren är mycket svalare, se Figur 1. Den ovannämnda situationen anses vara konservativ jämfört med en riktigt cistern eftersom volym-ytation är mindre och omslutningsgraden med heta ytor i taket är högre än i riktiga cisterner eftersom taket har en homogener temperatur. Däremot, eftersom tunnan är mindre än en riktigt cistern, finns det scenarier där residenstiden i en cistern är längre eftersom den heta ytan kan vara större. Under testerna så försöker detta att kontrast genom att hålla den högsta temperaturer i locket så att den hetaste gasen håller sig nära den varmaste ytan. Det borde bli ett stagnant gasskikt i toppen av behållaren på detta vis. Testerna i studien utfördes med heptan, bensin (95 oktanic med 5 % etanol, vinterkvalité), diesel och E85 (85 % etanol i volym och 15 % bensin [95]).

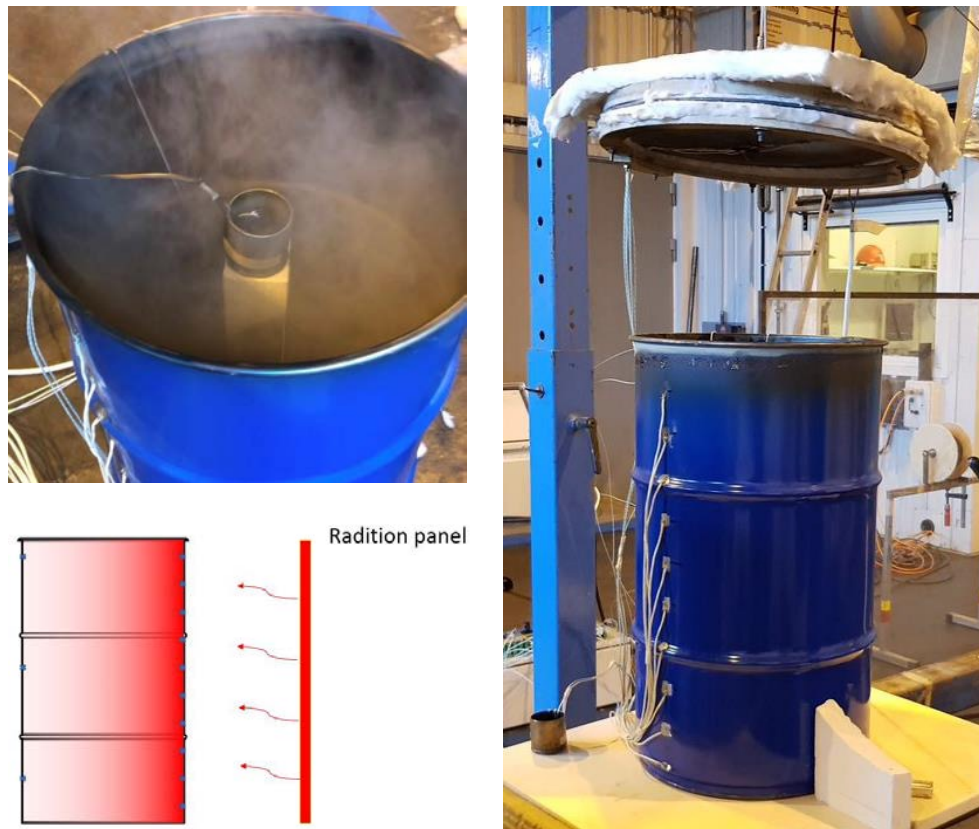
Testerna visade att den lägsta temperaturen för antändning av heptan är vid 330 °C, ungefär 100 °C över AIT. Temperaturen var opåverkad av bränsle mängd och avstånd mellan lock och bränslekopp.

Bensin antände inte alls i testerna, den högsta temperatur som användes i testen var 550 °C. Bränsle mängden varierades mellan 0,1 cl till 8 cl och avstånden mellan locket och bränslekoppen varierade ifrån 3 till 11 cm.

E85s lägsta AHT var vid 430°C, detta uppmättes när värmestrålningspanelen användes att värma upp en vertikal yta då antändning skedde med 0,3 cl E85. Större volymer bränsle

krävde högre temperaturer för antändning och lägre volymer antände inte alls. Utan att värma upp en vertikal yta observerades antändning en gång på en locktemperatur på 510 °C.

Diesels lägsta AHT var på 350 °C utan och 310 °C med en vertikal varm yta. Dieseltesterna är förmodligen de mest konservativa eftersom små volymerna av diesel leder till att de mindre flyktiga kolvätena, som kokar bort sist också kokar bort. Tyngre kolväten har en lägre AIT och därmed en lägre AHT. Den lägsta temperaturen för antändning för diesel var med 1 cl.



Figur 1. Försöksupställning, Hallberg et al (2019)

### Slutsats

I Tabell 2 har uppmätta värden för AHT resp termisk tändpunkt/AIT sammanställts och en rekommenderad temperatur för AHT att använda i Drivkraft Sveriges beräkningshjälpmedel angetts.

Den rekommenderade temperaturen har en säkerhetsmarginal >50°C mot RISE-testerna, eller som för fallet med etanol och E85 lagt sig på värdet som anges för etanols termiska tändpunkt i SEK Handboken. Etanol och E85 gav samstämmiga resultat i RISE-testerna.

Att uppskatta värden för Jet A-1, EO1, RME, Raps Metyl Ester är en FAME baserad på raps. Standard SS-EN14214 och HVO baserat på data från tester med Heptan och Diesel är möjligt eftersom det i Tabell 1 visas att antändningstemperatur är relativt ämnesoberoende för längre kolkedjor.

Den valda lägsta AHT på 270°C stämmer väl med tidigare rekommendationer som utfärdats i MSBs Brandskydd i oljedepå från 2000, som också angett 270°C som en acceptabel plåttemperatur för att förhindra brandspridning.

Bensin kan synas väl konservativt tilltaget, men eftersom bensinens sammansättning kan

variera är detta värde valt med hänsyn till det spann som gäller för termisk tändpunkt. Termisk tändpunkt för bensin är maximalt 470°C, medan ingen antändning uppnåddes hos RISE vid 550°C. Marginalen mellan termisk tändpunkt och AHT är således >80°C. Eftersom lägsta termisk tändpunkt för bensin är 280°C och om det adderas 50°C till denna blir rekommendationen för bensin ett AHT=330°C.

Tabell 2. Sammanställning av uppmätta värden för antändning mot het yta respektive termisk tändpunkt, samt rekommenderad temperatur för antändning mot het yta i Drivkraft Sveriges beräkningshjälpmedel.

Ämne	Antändning mot het yta (°C)				Termisk tändpunkt/AIT (°C)		Rekommenderad AHT (°C)
	RISE tester <sup>1)</sup>	RISE tester <sup>2)</sup>	Severy (1974)	Colwell & Reza 2005	SEK Handboken 426, v5	ECHA – databas	
Diesel	310	350	539	542	240	≥225	270
Eldningsolja EO 1					200	≥225	270
Jet A-1					225	220 - 250	270
Bensin	>550	>550	627	612	280-470	280-470	330
RME <sup>3)</sup>					240		270
Heptan	320	335			204	204 (n-heptan)	270
Ethanol	430	510			400	368,8 +/- 7,4	400
E85	430	510				363 - 455	400
HVO						204	270

<sup>1)</sup>Tester med en vertikal het yta och hett lock. <sup>2)</sup>Tester med enbart hett lock.

<sup>3)</sup> RME, Raps Metyl Ester är en FAME baserad på raps. Standard SS-EN14214

# REFERENSER

API. (1991). Ignition Risk of Hydrocarbon Vapors by Hot Surfaces in the Open Air (Publ. 2216), 2nd ed. Washington: American Petroleum Institute.

Babrauskas, V. (2008). IGNITION OF GASES, VAPORS, AND LIQUIDS BY HOT SURFACES. International Symposium on Fire Investigation Science and Technology. Sarasota, USA: National Association of Fire Investigators.

Colwell, J. D., & Reza, A. (2005). Hot Surface Ignition of Automotive and Aviation Fluids. Fire Technology, 41, 105-123.

Emil Hallberg, Johan Sjöström, Fredrik Kahl (2019) "Antändning av heptan, E85, bensin och diesel mot heta ytor", RISE Rapport 2019:66

LaPointe, N. R., Adams, C. T., & Washington, J. (2005). Autoignition of Gasoline on Hot Surfaces. Fire & Arson Investigator, 56(2), 18-21.

MSB, Brandskydd i oljedepå från 2000

SEK. (2017). SEK Handbok 426 Klassning av explosionsfarliga områden - Områden med explosiv gasatmosfär (5 uppl.). Kista: SEK Svensk Elstandard.

Severy, D. M., Blaisdell, D. M., & Kerkhoff, J. F. (1974). Automotive Collision Fires. Proc. 18th Stapp Car Crash Conf. (ss. 113-199). Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers.

Drivkraft Sverige. (2016). Rekommendation för begränsning av brandspridning mellan depåcisterner. Stockholm: Svenska Petroleum och Biodrivmedelsinstitutet.

The Institute of Petroleum (1993) "Fire Precautions at Petroleum Refineries and Bulk Storage Installations Model Code of Safe Practice, Part 19",

Ungut, A., & James, H. (2001). AUTOIGNITION OF GASEOUS FUEL-AIR MIXTURES NEAR A HOT SURFACE. Hazards XVI: Analysing the Past, Planning the Future (ss. 487-501). Manchester, UK: IChemE.



# Hållbar och innovativ mobilitet ▶



---

**Drivkraft Sverige AB**

Nybrogatan 11, SE-114 39 Stockholm

Tel 08-667 09 25 Fax 08-667 09 54 [www.drivkraftsverige.se](http://www.drivkraftsverige.se)

Branschorganisationen för drivmedels-, bränsle-, bitumen- och smörjmedelsbolagen i Sverige.

