



Släcksystem med vattendimma - en förnyad kunskapssammanställning

Brandforsk projekt 500-121

Magnus Arvidson

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Släcksystem med vattendimma - en förnyad kunskapssammanställning

Brandforsk projekt 500-121

Magnus Arvidson

Abstract (extended)

Water mist fire protection systems – an updated state-of-the-art report

In 2001, the SP Rapport 2001:26, "Släcksystem med vattendimma – en kunskapssammanställning" (A progress report on water mist fire protection systems) was published. Since then, much has happened; technology development is moving forward and the technology is now used for fire hazards for which "water mist" was previously considered impossible to apply. The objective of the project presented in this report has been to: conduct a literature study on water mist fire protection systems that describes the technological developments which have been seen in recent years, gather experience and results from confirmatory experiments for different applications, provide a summary of the installation requirements and testing methods with its application, and provide examples of both good and bad experience from real installations.

Road tunnels is an application where sprinkler systems are not particularly common. Increased traffic on the road network, increasing numbers of tunnels and especially more serious tunnel fires have pioneered sprinklers in road tunnels. Water mist systems have been promoted as an alternative to traditional sprinkler or water spray systems and in recent years several extensive large-scale have been test conducted. The experiments show that the systems' advantages are primarily through cooling of hot gases and preventing the spread of fire to neighboring vehicles. A similar application is the protection of the parking garages for cars. Several test series show that water mist is comparable in performance to traditional sprinkler systems, although the distance between the nozzles is often higher and water flow rates lower.

Ceiling and sub-floor areas where the primary fire risk and fire load consists of electric cables on cable trays is another application where water mist can be used as an alternative to traditional sprinklers. In these cases, the nozzles are optimized to provide a good coverage. Further, water mist systems can activate faster than traditional sprinkler thanks to lower nominal activation temperatures and lower RTI-values.

Protection of prison cells represents another application where mist may be a good fit, both in terms of permanently installed automatic systems and for manual fire-fighting. There are automatic (glass bulb) nozzles in the market for prison cells or hospital rooms where inmates are suicidal or self-injury prone. The nozzle is designed so that it is difficult to unscrew. If the holder of the glass bulb is exposed to a load of 150 N (about 15 kg) the nozzle activates.

New technology on the market includes systems where the water droplets are generated in a generator with a patented technology consisting of, among other things, an oscillating plate. Compared with a system of hydraulic atomization, the water droplets are significantly smaller, in the order of less than 10 microns compared to 50 to 150 microns. This means that the water droplets obtain physical properties similar to a gas, e.g. they are transported with air currents and can be distributed around obstructions. Other systems combine mist and inert gas, usually nitrogen. The inert gas has multiple functions. It is used as a propellant for pressing water from a vessel into the system piping, it is used to atomize the water into very small water droplets at the nozzle and ultimately it contributes to the extinguishing efficiency by reducing the oxygen concentration in the protected compartment. The velocity through the nozzles is high and the mixing in the protected compartment is good. Further, as water quantities are very small, the risk of water damage is low.

Although water is an effective extinguishing agent, various additives significantly improve the fire-fighting capabilities of water. Small-scale tests with a variety of additives indicate that alkali salts are very effective even at moderate concentrations. Additives can also be used, e.g. to prevent freezing (antifreeze) but in this application there is concern instead is that the agent might impair the fire-fighting effect of the system. All antifreeze agents have advantages as well as disadvantages and limitations. Generally, antifreeze increases the density, viscosity, the volumetric expansion and corrosiveness while reducing the surface tension compared to pure water. Some will add energy to a fire, thus increasing the fire power whilst others, like potassium acetate improve extinguishing efficiency compared to pure water.

Water mist curtains may reduce heat transfer by thermal radiation from a fire to an object to be protected, thereby delaying or preventing the spread of fire. This is because the water atomized efficiently absorbs thermal radiation from the fire. Water curtains are an established technology for protecting storage tanks with flammable liquids or gases. The water curtain can be downward, in front of the object to be protected, or can spray water directly towards the lateral surface. Experiments show that it is most effective if the water spray is directed such that it hits the envelope surface and the radiation attenuation may be as high as 90%.

The reliability of systems such as water mist has often been discussed and there are extensive and detailed fault tree analyses available that at least give an indication of the reliability of different systems. An analysis by FM Global shows that the impact of individual components varies with the system solution. Errors with great impact on the probability of a system failure include: that the water supply has no water, the pressure is too low in the drive gas reservoir, incorrect control settings, errors in the fire panel or transmission errors and closed main valves. Human error, such as that the propellant or water tank is empty or that the control settings are wrong, are common. Failure of the fire control panel (if used) or transmission failures are among the five largest contributions to system failure. There are also studies where the reliability of various fire-fighting systems on ships has been analyzed. The analysis shows that traditional automatic sprinklers have a high reliability. Reliability is of the same order of magnitude but slightly lower for water mist systems. The strength of a fault tree analysis is that it can be used for any system regardless of its complexity. The weakness is that it does not take into account the interactions between components and cascading effects. The reliability of the various components of a system are not necessarily independent. A failure in one component can propagate to the next component. For that reason, a fault tree analysis only provides an approximation of a system's actual reliability. Nevertheless, the methodology does yield useful results when no other option is available. It is recommended that the results are compared with results from experiments or historical data to verify the calculation model.

Several systems described in this report will require a separate fire detection system, e.g. prisons, Q-FOG, auditorium floor mounted nozzles and aircraft hangars. The ability to achieve the desired level of safety is largely based on the use of sufficiently good fire detection systems with multi-sensor detectors that are able to provide early detection even in a problematic environment (for example with heavy smokers). Something that is often unclear is how delayed detection affects extinguishing performance.

Experience from actual installations shows that there are both good and bad examples. In both cases, lessons learned can improve systems, practices, maintenance procedures, etc. The risk of clogging of filters and nozzles was one of the concerns which particularly highlighted when water mist technology was introduced in the early 1990s. The experience documented here shows that these fears have been realized in several installations. Another common experience is that the application is sometimes not

covered by the system's certificate or that one system solution is quoted and another installed. Two serious incidents show that closed spaces without direct access to the open air are unfit for storage of pressurized inert gases. If the space instead is facing the open, pressure relief valves can be installed which open in the case of a gas outlet and ventilate the space. Opening the door to the space also helps ventilation when someone enters the space.

There are also examples where automatic nozzles (i.e. with a glass bulb) have failed to activate during field testing. This shows how important it is that all parts of a system be regularly tested, including the automatic nozzles. For traditional sprinkler systems, it is required that sprinkler samples from a system be removed and tested. This should of course also be applied to water mist systems.

Key words: Water mist, fire-fighting systems, literature survey.

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
SP Technical Research Institute of Sweden

SP Rapport 2014:30
ISBN 978-91-87461-76-7
ISSN 0284-5172
Borås 2014

Innehållsförteckning

Abstract (extended)	3
Innehållsförteckning	6
Förord	8
Sammanfattning	9
1 Nya tillämpningar	12
1.1 Vägtunnlar	12
1.2 Parkeringsgarage	13
1.2.1 Försök med högtryckssystem	14
1.2.2 Försök med lågtryckssystem	15
1.3 Ro-ro däck på fartyg	15
1.4 Tunnelbanevagnar	18
1.5 Fängelseceller	18
1.6 Undertak- och övergolvsutrymmen	22
1.6.1 Försök med högtryckssystem	23
1.6.2 Försök med lågtryckssystem	24
2 Ny teknik	26
2.1 NanoMist®	26
2.2 System som kombinerar kvävgas och vattendimma	27
2.3 AutoMist	27
2.4 Q-FOG	29
3 Utveckling av befintlig teknik	30
3.1 Munstycken för fängelseceller	30
3.2 Golvmonterade munstycken	30
3.2.1 Munstycken för skydd av auditorium	30
3.2.2 Munstycken för skydd av flygplanshangarer (lågtryckssystem)	32
3.2.3 Munstycken för skydd av flygplanshangarer (högtryckssystem)	33
3.3 Teknik för avluftning av system och provning av munstycke	33
3.3.1 Teknik för högtryckssystem	33
3.3.2 Teknik för lågtryckssystem	34
4 Installationsregler och provningsmetoder	35
4.1 National Fire Protection Association (NFPA)	35
4.2 Underwriters Laboratories (UL)	35
4.3 FM Approvals	36
4.3.1 FM 5560	36
4.3.2 FM 5580	38
4.4 CEN/TS 14972	39
4.5 VdS	40
5 Tillämpad forskning och utveckling för specifika applikationer	41
5.1 Beräkning av tillförlitlighet för olika systemlösningar	41
5.1.1 Felträdsanalys av tillförlitligheten för åtta olika systemlösningar	41
5.1.2 Felträdsanalys av tillförlitligheten för system på fartyg	42
5.2 Maskinrum i ubåtar	43
5.3 Lastutrymmen på flygplan	44

5.4	Utvärdering av additiver	46
5.4.1	Studie vid University of Ulster	46
5.4.2	Studie vid Shanghai Maritime University	48
5.5	Utvärdering av frysskyddsmedel för våtrörsystem	50
5.6	Reduktion av värmestrålning	53
5.7	Samband mellan tid till släckning och vattendroppstorlek och brandeffekt	56
6	Goda såväl som mindre goda erfarenheter från verkliga installationer	60
6.1	Inledning	60
6.2	Goda erfarenheter	60
6.2.1	Branden ombord på Star Princess	60
6.2.2	Släckt brand i korvfabrik	61
6.3	Mindre goda erfarenheter	62
6.3.1	Automatiska munstycken på passagerarfartyg som inte aktiverar	62
6.3.2	Ändring i produktdatablad efter besiktningsanmärkning	63
6.3.3	Igensättning av systemets huvudfilter	64
6.3.4	Olyckstillbud med utläckande kvävgas	64
6.3.5	Felaktivering av fasadskydd	65
6.3.6	Vattenskada vid fullskaleprov	65
6.3.7	Igensatta munstycken vid anslutning till befintlig vattenkälla	65
6.3.8	Problem med rörkoppling, fördelning av vattendroppar, igensättning av filter, etc.	66
6.3.9	Upprepad igensättning av huvudfilter	66
6.3.10	Utformning av returvattenledning	66
7	Diskussion och slutsatser	67
7.1	Nya tillämpningar	67
7.2	Ny teknik	67
7.3	Additiver och frysskyddsmedel	68
7.4	Reduktion av värmestrålning	68
7.5	Tillförlitlighet och branddetektion	68
7.6	Både bra och dåliga erfarenheter	69

Förord

Under år 1999 uttryckte en referensgrupp önskemål att Brandforsk skulle initiera en litteraturstudie om användningen av vattendimma med fokusering på landbaserade installationer. Man såg ett växande intresse att använda vattendimma i många olika applikationer och det fanns ett stort kunskapsbehov bland användare, brandskyddskonsulter, räddningstjänst, myndigheter och andra. Samtidigt fanns det väldigt lite skrivet på svenska. Brandforsk finansierade därför en omfattande litteraturstudie för att ge en översikt av befintlig teknik, beskriva olika typer av system, beskriva släckmekanismer, droppstorleksfördelning, vedertagna provningsmetoder och att redovisa erfarenheter från verifierande försök för olika typer av tillämpningar. Projektet redovisades i SP Rapporten 2001:26, "Släcksystem med vattendimma – en kunskapssammanställning" [1]. Rapporten, som kan laddas ned kostnadsfritt från www.sp.se har med åren blivit en verklig "storsäljare".

Mycket har hänt på de drygt tio år som gått sedan rapporten publicerades. Teknikutvecklingen går framåt och tekniken tillämpas numera för brandrisker där man för drygt tio års inte trodde att "vattendimma" var möjligt att använda. Det finns därför återigen ett behov att sammanställa, dokumentera och göra ny kunskap och erfarenheter tillgänglig för en bredare krets. Inte minst för slutanvändare, brandskyddskonsulter, myndighetsutövare, etc. som ställs inför uppgiften att bedöma när vattendimma är lämpligt eller ej. Målsättningen med projektet som redovisas i denna rapport var att genomföra en litteraturstudie om släcksystem med vattendimma som:

- 1) Beskriver de senaste årens teknikutveckling inom området.
- 2) Sammanställer erfarenheter och resultat från verifierande försök för olika tillämpningar.
- 3) Sammanställer installationsregler samt provningsmetoder med dess tillämpningar.
- 4) Ger exempel på goda såväl som dåliga erfarenheter från verkliga installationer.

Projektet omfattar fasta system avsedda både för fartyg och landbaserade applikationer. Till projektet knöts en referensgrupp där följande personer ingick:

Kenneth Hedman	Precendo AB (representerade Sprinklerfrämjandet)
Anders Kjellberg	Ultra Fog AB
Mats Norling	Ultra Fog AB
Kjell Ekström	Fortifikationsverket
Jens Hjort	Brandskyddsföreningen Sverige
Joel Jacobsson	Södra Älvsborgs Räddningstjänstförbund
Jan Blomqvist	Siemens AB (representerade Säkerhetsbranschen)
Göran Person	Marioff Skandinavien AB
Per-Erik Johansson	Brandforsk

Projektets interna projektnummer var BRd 6042.

Ett särskilt tack riktas till Jens T. Jepsen och Henrik Bygbjerg från Danfoss Semco A/S, Maarit Tuomisaari från Maroff Corporation Oy, Erling Mengshoel från Prevent Systems AS, Alex Palle från VID Fire-Kill ApS, Erik Chritensen från Novenco Fire Fighting AS samt Rüdiger Kopp från FOGTEC Brandschutz GmbH & Co. KG som bidragit med information och foton till rapporten.

Sammanfattning

Denna rapport beskriver de senaste årens teknikutveckling inom området, redovisar erfarenheter och resultat från verifierande försök för olika tillämpningar, beskriver installationsregler samt provningsmetoder med dess tillämpningar och ger exempel på goda såväl som dåliga erfarenheter från verkliga installationer.

Vägtunnlar är en tillämpning där sprinkler inte är eller varit särskilt vanlig. Ökad trafik på det europeiska vägnätet, allt fler tunnlar och inte minst flera allvarliga tunnelbränder har banat väg för sprinkler i vägtunnlar. System med vattendimma har lanserats som ett alternativ till traditionella sprinkler- eller vattenspraysystem och på senare år har flera omfattande fullskaliga försöksserier genomförts. Försöken visar att systemens fördelar framförallt är kylning av varma brandgaser och förhindrande av brandspridning till närstående fordon.

En liknande tillämpning är skydd av parkeringsgarage för personbilar. Flera försöksserier visar att vattendimma är jämförbart med traditionella sprinklersystem, trots att avståndet mellan munstyckena ofta är större och vattentätheten lägre.

Undertak- och övergolvsutrymmen där den primära brandrisken och brandbelastningen utgörs av elkablar på kabelstegar är en annan tillämpning där vattendimma kan användas som ett alternativ till traditionella sprinkler. I dessa fall är munstyckena optimerade för att ge en bra täckning och aktiverar dessutom snabbare än traditionella sprinkler tack vare lägre nominell aktiveringstemperatur och lägre RTI-värde.

Skydd av fängelseceller är en ytterligare tillämpning där vattendimma kan passa bra, både som fast installerade automatiska system och för manuell brandsläckning. Ett problem i fängelser är risken för avsiktlig åverkan på munstycken eller att de utnyttjas för att fästa upp ett rep eller en snara. Det finns automatiska (med glasbulb) munstycken på marknaden för fängelseceller eller vårdrum där intagna är självmords- eller självskadebenägna. Munstycket är konstruerat så att det svårt att skruva isär. Om hållaren för glasbulben utsätts för en last om 150 N (cirka 15 kg) aktiverar munstycket.

Ny teknik på marknaden inkluderar system där vattendropparna alstras i en generator med en patenterad teknik bestående av bland annat en oscillerande platta. Jämfört med ett system med hydraulisk sönderdelning av vattnet är vattendropparna betydligt mindre, i storleksordningen mindre än 10 μm jämfört med 50 – 150 μm . Det här innebär att vattendropparna får fysikaliska egenskaper som liknar en gas, de följer luftströmmar och kan distribueras runt obstruktioner. Andra system kombinerar vattendimma och inertgas, vanligen kvävgas. Kvävgasen har flera funktioner, dels används den som en drivgas för att trycka vattnet från ett tryckkärl ut i systemets rör, dels används den för att sönderdela vattnet till mycket små vattendroppar vid munstycket och slutligen bidrar den till släckeffektiviteten genom att syrekoncentrationen i utrymmet reduceras. Hastigheten genom munstyckena är hög och omblandningen i det skyddade utrymmet är god. Eftersom vattenmängderna är mycket små minskar risken för vattenskador.

Även om vatten är ett effektivt släckmedel kan olika additiver väsentligt förbättra släckförmåga. Försök i mindre skala med ett olika additiver visar att alkalimetallsalter är mycket effektiv även vid måttliga koncentrationer. Tillsats för att förhindra frysning (frys-skyddsmedel) är en annan tillämpning där farhågorna istället är att medlet skall försämra släckeffektiviteten. Alla frys-skyddsmedel har fördelar såväl som nackdelar och begränsningar. I vissa fall är begränsningarna sådana att ett visst frys-skyddsmedel vid en viss koncentration inte är användbar för vattendimsystem. I andra fall dikterar den specifika tillämpningen och utformningen av systemet om frys-skyddsmedlet är

användbart eller ej. Generellt ökar frysskyddsmedel densiteten, viskositeten, den volumetriska expansionen och korrosiviteten samt reducerar ytspänningen jämfört med rent vatten. Propylenglykol, glycerin och betain tillför energi till en brand och ökar därmed brandeffekten medan kaliumacetat förbättrar släckeffektiviteten jämfört med rent vatten.

Ridåer med vattendimma kan reducera värmeöverföringen genom värmestrålning från en brand till ett objekt som skall skyddas och därigenom fördröja eller förhindra brandspridning. Detta beror på att vatten i finfördelad form effektivt absorberar värmestrålningen från branden. En teoretisk och experimentell studie av hur denna strålningsabsorption kan optimeras finns gjord. Vatten är mycket effektivt vad gäller att absorbera värmestrålning men å andra sidan är den sträcka som strålningen passerar genom själva dropparna relativt kort. Det finns en optimal droppdiameter $d \approx 1 \mu\text{m}$ när vattendropparna absorberar strålningen mest effektivt. Så små vattendroppar kan dock vara svårt att åstadkomma i praktiken. Dessutom förångas dropparna av värmestrålningen och diametern varierar under en droppes livstid. För extremt små droppar är absorptionen som mest effektiv för strålningstemperaturer runt 800°C , vilket är en typisk flamtemperatur vid bränder. Vattenridåer är en vedertagen teknik för att skydda lagringstankar med brandfarliga vätskor eller gaser. Vattenridån kan var nedåtriktad, framför det objekt som skall skyddas eller så kan vattensprayen vara direkt riktad mot mantelytan. Försök visar att det är mest effektivt om vattensprayen riktas så att den träffar mantelytan och att strålningsdämpningen då kan vara så hög som 90%.

Tillförlitligheten för system av typen vattendimma har ofta diskuterats och det finns omfattande och detaljerade felträdsanalyser som åtminstone ger en indikation om tillförlitligheten för olika systemlösningar. Vid analyserna görs en del förenklingar och antaganden och som indata användas data för ingående komponenter men från andra tillämpningar. En analys av FM Global visar att inverkan av enskilda komponentfel varierar med systemlösningen. Fel med stor inverkan på sannolikheten för ett systemfel är normalt att vattenkällan saknar vatten, att trycket är för lågt i drivgasbehållare, felaktiga styreinställningar, fel i brandlarmcentral eller överföringsfel, stängd huvudventil och fel i brandlarmcentral. Mänskliga fel, som att drivgas eller vattenbehållare är tomma eller att styreinställningar är fel, är vanliga. Fel i brandlarmcentralen (förutsatt sådana används) eller överföringsfel som ledningsbrott eller anslutningsfel är generellt bland de fem största bidragen till systemfel.

Det finns även studier där tillförlitligheten för olika släcksystem på fartyg analyserats. Analysen visar ett traditionellt automatiskt sprinklersystem har en hög tillförlitlighet. Tillförlitligheten är i samma storleksordning men något lägre för system av typen vattendimma. Styrkan med en felträdsanalys är, enligt rapporten, att den i princip kan användas för vilket system som helst oavsett dess komplexitet. Svagheten är att den inte beaktar samspelet mellan komponenter och dominoeffekter. Tillförlitligheten för olika komponenter i ett system är inte nödvändigtvis oberoende, ett fel i en komponent kan fortplanta sig till nästa komponent. Av det skälet är en felträdsanalys endast en approximation av ett systems verkliga tillförlitlighet. Inte desto mindre kan metodiken ge användbara resultat när inget annat källmaterial finns till hands. Det rekommenderas att resultaten jämförs med resultat från försök eller historiska data för att verifiera beräkningsmodellen.

Flera system som beskrivs i rapporten kräver ett separat branddetektionssystem för att aktivera. Det gäller de beskrivna applikationerna; fängelse, Q-FOG, auditorium med golvmonterade munstycken och flygplanshangarer. Systemets förmåga att skapa personsäkerhet bygger till stor del på användningen av tillräckligt bra detektering med en flersensordetektor som klarar att ge detektering i tidigt även i problematisk miljö (till exempel storrökare). Något som ofta inte förefaller klarlagt är hur en 'sen' detektering

påverkar släckfunktionen och ändå ger tillfredställande säkerhet för den eller de personer som ska skyddas. Branddetektionen betydelse och avsaknaden av information kan medföra risker för dåliga lösningar, både om systemet är alltför känsligt (risk för felaktivering) och kanske i ännu högre grad om det är alltför okänsligt.

Erfarenheterna från verkliga installationer visar att det både finns bra och dåliga erfarenheter. I båda fallen går det förstås att dra lärdom av erfarenheterna och förbättra system, praxis, underhållsrutiner, etc. Några av de fall som redovisas i rapporten är sannolikt inte specifika för just system av typen vattendimma, till exempel att en systemlösning offereras och att en annan lösning installeras men är ändå intressanta att redovisa för ett helhetsperspektiv.

Risk för igensättning av filter och munstycken var en av de farhågor som särskilt lyftes fram när tekniken med vattendimma introducerades på bred front i början av 1990-talet. Erfarenheterna som dokumenteras här visar att dessa farhågor har besannats i ett flertal installationer. En annan vanlig erfarenhet är att tillämpningen av systemen ibland inte omfattas av systemets certifikat eller att en systemlösning offererats och en annan installerats. Två allvarliga tillbud visar att slutna utrymmen utan direkt utgång till det fria är olämpliga för lagring av trycksatta inertgaser. Om utrymmet istället vetter mot det fria går det att installera tryckavlastningsventiler som öppnar vid ett gasutflöde och ventilerar utrymmet. Öppning av dörr till utrymmet bidrar också till ventilation när någon tillträder utrymmet.

Det finns även exempel när automatiska munstycken (med glasbulb) inte aktiverat vid fältprovning. Det visar hur viktigt det är att alla delar av ett system regelbundet funktionsprovas, även de automatiska munstyckena. För traditionella sprinklersystem i landanläggningar krävs att ett antal sprinkler från varje system demonteras och funktionsprovas. Detta bör förstås även tillämpas för vattendimsystem.

Sökord: Vattendimma, släcksystem, kunskapssammanställning.

1 Nya tillämpningar

1.1 Vägtunnlar

Flera omfattande bränder i vägtunnlar, bland annat i Mont Blanc (1999), Tauern (1999), St. Gotthard (2001) och Fréjus (2005) har orsakat ett stort antal omkomna och gett stora direkta och indirekta skadekostnader, inte minst stilleståndskostnader. Händelserna har påskyndat acceptansen för installation av sprinklersystem i vägtunnlar något som åtminstone i Europa tidigare varit mycket ovanligt.

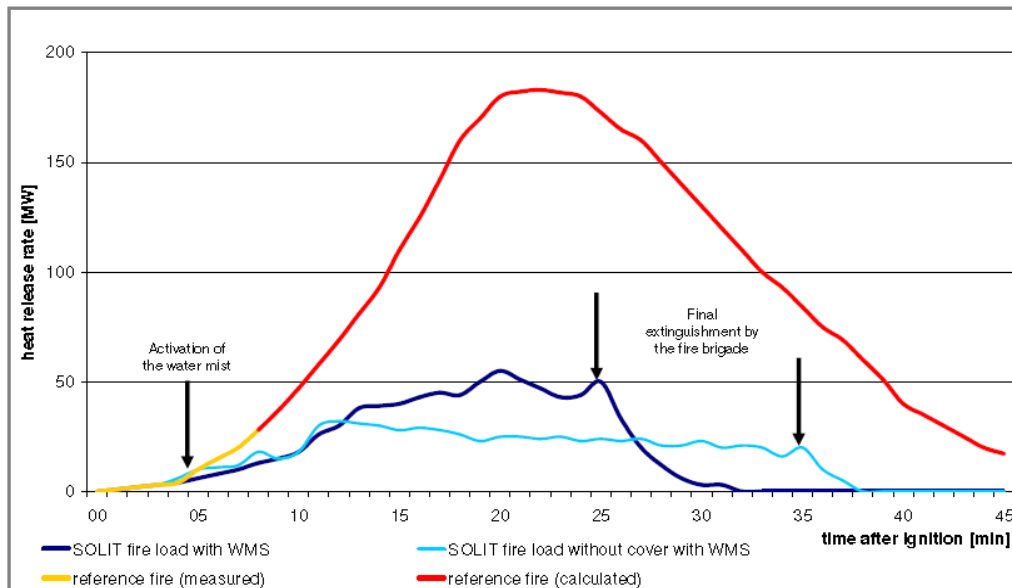
System med vattendimma har lanserats som ett alternativ till traditionella sprinkler- eller vattenspraysystem och på senare år har flera omfattande fullskaliga försöksserier genomförts, bland annat i Norge, Nederländerna, Tyskland, Österrike, Frankrike och Spanien. Försöken har bevisats av nationella certifieringsorgan och transportmyndigheter. Nationella transportmyndigheter har oberoende av varandra utvecklat brandscenarier och acceptanskriterier för att avgöra om systemen skall bedömas som acceptabla eller ej. Vanliga brandscenarier är poolbränder, brand i en eller flera personbilar och brand i simulerade långtradare lastade med organiska material blandat med plast [2].

Målsättningen med ett sprinklersystem är att det skall:

- Begränsa värmepåverkan på tunnelkonstruktionen genom att kyla brandgaserna.
- Begränsa brandeffekten genom direkt kylning, förångning av vatten, reduktion av syrekonzentrationen och absorption av värmestrålning.
- Förhindra eller fördröja spridning av brand från ett fordon till andra fordon genom att kyla brandgaserna och absorbera värmestrålning.
- Underlätta utrymning.
- Underlätta manuell brandsläckning genom att begränsa brandeffekten, kyla brandgaserna och absorbera värmestrålning.

Figur 1 visar brandeffekten vid ett försök med ett högtryckssystem i en tunnel. Brandscenariot bestod av fristaplade träpallar i en konfiguration som liknar en långtradartrailer. Brandeffekten för en fribrinnande brand har beräknats och utgör referens till de två försök som redovisas, ett försök där försökuppställningen är täckt av en presenning och ett försök där uppställningen inte är täckt [3].

Graferna visar att systemet aktiveras när branden är omkring 5 MW men att den fortsätter att utvecklas till en nivå mellan omkring 25 MW och 50 MW där den hålls under kontroll av systemet. Den fribrinnande branden når en beräknad brandeffekt runt 180 MW.



Figur 1 Uppmätt och beräknad brandeffekt vid brandförsök i en vägtunnel. Graferna visar att systemet aktiveras när branden är omkring 5 MW men att den fortsätter att utvecklas till en nivå mellan omkring 25 MW och 50 MW där den hålls under kontroll av systemet. Den fribrinnande branden når en beräknad brandeffekt runt 180 MW [3].

Graferna är en bra illustration att vattendimma inte kan förväntas släcka en brand i ett fordon i en tunnel utan snarare att branden kontrolleras och förhindras att nå sin potentiellt maximala brandeffekt. Det har även gjorts anspråk att vattendimma skulle kunna "skrubba" brandgaser i en tunnel och på det sättet förbättra siktbarheten och göra atmosfären andningsbar. Den huvudsakliga effekten är dock att vattendimma sänker gastemperaturen och i viss mån tvättar bort en mindre mängd sot och de gaser som är vattenlösliga, men inte till den grad att miljön kan betraktas som överlevnadbar [4].

1.2 Parkeringsgarage

VdS Schadenverhütung har publicerat flera brandprovningmetoder (se kapitel 4.5) för vattendimma. En av dessa är en brandprovningmetod för parkeringsgarage [5, 6]. Metoden simulerar verkliga förhållanden så tillvida att vanliga personbilar används. Bilarna är skrotbilar men skall vara intakta med hela vindrutor, etc. Bilarnas bränsletankar skall vara tömda på bränsle. Tre bilar parkeras sida vid sida under ett tak. Avståndet mellan bilarna skall vara 60 cm. Branden startas med två baljor med heptan som placerades under den mittersta bilen och antändes. Branden får därmed ett relativt häftigt förlopp som snabbt involverar underredet, samtliga däck och motorrummet.

Kraven i provningsmetoden bygger på att det system som provas skall ha en effektivitet som är jämförbar med traditionella sprinkler. Därför utförs först försök med sprinkler där temperaturen i taket ovanför branden mäts med termoelement. Temperaturen mäts också med plattermoelement framför och bakom de uppställda bilarna vilken ger en uppfattning om risken för brandspridning. Vid försök genomförda vid SP Brandteknik mäts även yttemperaturen på karosserna på bilarna på ömse sidor om den mittersta bilen. Detta tillsammans med en visuell bedömning av eventuella brandskador ger en uppfattning om risken för brandspridning mellan bilarna. Den mittersta bilen placeras så att den antingen är direkt under en sprinkler eller mellan fyra sprinkler. Försöket som ger sämst resultat av dessa uppställningar skall repeteras.

Det traditionella sprinklersystemet, som alltså utgör referenssystem, installeras med 3.5 m × 3.5 m horisontellt avstånd mellan sprinklerna. Systemet dimensioneras för en vattentäthet om 6.5 mm/min vilket motsvarar 80 liter/minut per sprinkler.

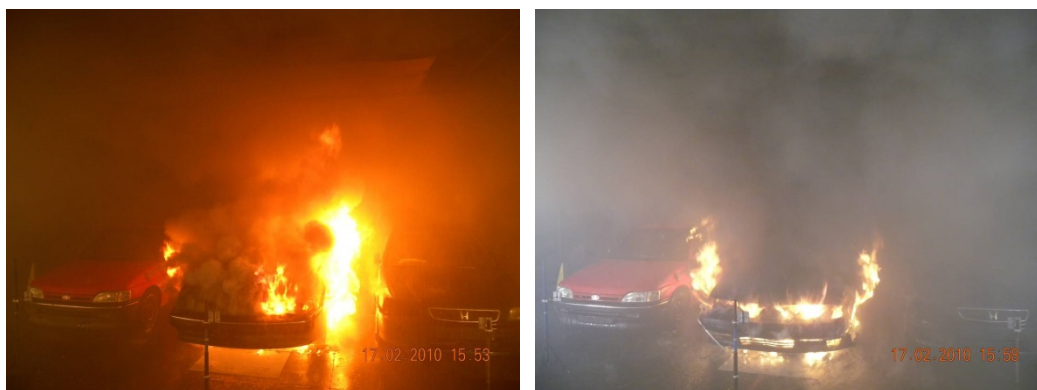
Vattendimsystemet som provas tillåts att installeras med större avstånd mellan munstyckena. Typiskt är att dessa system har glasbulber med lägre nominell aktiveringstemperatur och lägre RTI-värde än de traditionella sprinklerna. Munstycken aktiveras därför i ett tidigare skede av brandförloppet även om avståndet mellan munstyckena är längre.

Nedan redovisas resultat från två olika försöksserier genomförda enligt ovanstående brandprovningsmetod. Försöken visar att ett rätt dimensionerat och installerat vattendimsystem ger en skyddsnivå som är fullt jämförbar med ett traditionellt sprinklersystem för parkeringsgarage. Dessutom är det möjligt att både öka avståndet mellan munstyckena och/eller att reducera det totala vattenflödet.

1.2.1 Försök med högtryckssystem

Försök gjordes med ett vattendimsystem dimensionerat med 60 bars tryck vid SP Fire Research [7]. Munstyckena installerades uppåtriktade med ett större horisontellt avstånd jämfört med sprinklersystemet.

Referensförsöken med de traditionella sprinklerna visade att de har en bra effektivitet mot bilbränder. Eftersom branden i princip är helt dold för direkt vattenpåföring av karossen är den primära effekten av sprinklerna att förhindra brandspridning och att sänka temperaturen i taknivå. Branden spred sig inte till någon av de vidstående bilarna i något av försöken. Medeltemperaturen i taket var som mest runt 100°C. Figur 2 visar ett av försöken med traditionella sprinkler, dels precis innan första sprinkler aktiverat och dels ungefär fem minuter senare.



Figur 2 Ett av försöken med traditionella sprinkler precis innan första sprinkler aktiverat (vänster) och ungefär fem minuter senare [7].

Resultaten för vattendimsystemet var jämförbart med det traditionella sprinklersystemet, trots att avståndet mellan munstyckena var större och vattentätheten betydligt lägre. Inte heller med vattendimma når vattendropparna den primära brandhärden under bilen. Men systemet reducerar taktemperaturen bättre än sprinklersystemet tack vare de mindre vattendropparnas bättre kylförmåga. Brandspridning mellan bilarna förhindras tack vare den direkta kylningen (vätningen) av bilarna och av de små vattendropparnas goda förmåga att absorbera värmestrålning. Figur 3 visar branden i ett av försöken sekunderna efter att det första munstycket aktiverat samt brandskadorna efter försöket.



Figur 3 Branden i ett av försöken med högtryckssystemet sekunderna efter att det första munstycket aktiverat samt brandskadorna efter försöket [7].

1.2.2 Försök med lågtryckssystem

Dessa försök gjordes med ett vattendimssystem dimensionerat med cirka 8 bars tryck vid SP Fire Research [8]. Munstycken var installerade uppåtriktade och avståndet mellan munstycken var 3.5 m × 3.5 m. Resultaten visade att vattendimsystemet var jämförbart med det traditionella sprinklersystemet med en vattentäthet som var ungefär hälften så högt. Figur 4 visar branden när två munstycken aktiverat i ett av försöken samt brandskadorna efter.



Figur 4 Branden i ett av försöken med lågtryckssystemet sekunderna efter att två munstycken aktiverat samt brandskadorna efter försöket [8].

1.3 Ro-ro däck på fartyg

Under slutet av 1990-talet och början av 2000-talet finansierade bland annat Brandforsk flera projekt som studerade problematiken med bränder på ro-ro däck på fartyg och dimensioneringen av sprinklersystemen, se SP Rapport 1997:03 [9] och SP Rapport 1997:15 [10] som diskuterar brandförlopp och sprinklerdimensionering. I den senare rapporten redovisas ett fullskaleförsök med en uppställning som representerar två lastbilar, sida vid sida, på ett bildäck. Försöket finns även dokumenterat på video [11]. I SP Rapport 2002:15 [12] redovisas en fördjupad studie som visar att vattenbaserade släcksystem kan användas för de allra flesta lastutrymmen och typer av gods. Undantag är bulklaster med spannmål, träflis, pellets och liknande. För dessa typer av laster är gassläcksystem (inertgaser) mer lämpliga. Merparten av de ämnen och föremål som klassas som farligt gods kan också skyddas med vattenbaserade släcksystem. För vissa ämnen och klasser är dock vatten olämpligt som släckmedel. Exempelvis kan vatten

påskynda spridningen av brandfarliga vätskor, särskilt sådana som inte är vattenlösliga. Genom inblandning av skumvätska i vattnet går det dock att släcka bränder i brandfarliga vätskor.

Detaljkraven för hur ett vattensprayssystem för bildäck skall utformas och dimensioneras återfinns i Resolution A.123(V) från år 1967, se referens [13]. Några av de detaljkrav som särskilt kan nämnas är:

- Systemet skall dimensioneras för en vattentäthet om minst 3.5 mm/min för däck med maximalt 2.5 m höjd och för minst 5 mm/min för däck med högre takhöjd
- Systemet tillåts att delas in i sektioner där varje sektion skall täcka hela fartygets bredd. Undantag från detta krav kan medges om däckets är avdelat i längsled av väggar i "A" klass
- Varje sektion skall vara minst 20 m lång och systemets pumpar skall ha en kapacitet tillräcklig för att klara antingen hela däckets eller minst två sektioner
- Sektionsventiler skall vara placerade utanför det skyddade utrymmet

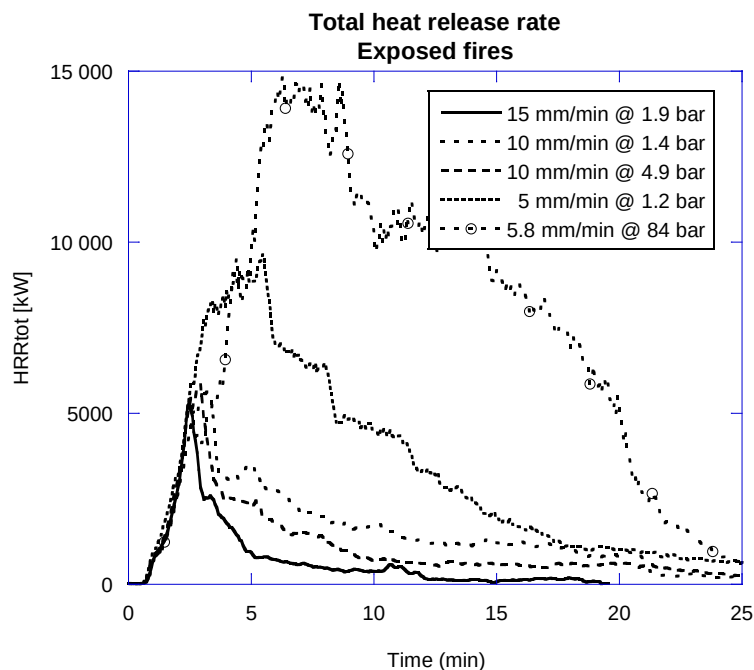
Det tekniska bakgrundsmaterial till ovanstående detaljkrav är förmodligen en serie brandförsök som genomfördes i Danmark år 1961, se referens [14].

Det engelska sjöfartsverket Maritime and Coastguard Agency (MCA) undersökte frågan om brandskydd på ro-ro däck, inklusive frågeställningen om den höga brandbelastningen på ro-ro däck och effektiviteten hos nuvarande sprinklersystem. Deras rapport [15], drar två intressanta slutsatser; den internationella sjöfartsnäringsen bör samordna sina insatser och sin kunskap inom detta område och försöksprogram med storskaliga brandförsök bör utföras för att öka kunskapen när det gäller bränder och brandscenarier på ro-ro-däck. Ett sådant program bör studera faktorer såsom omfattningen av brännbara material, antändningskällor, fordonens storlek, fordon uppställning på däck, positionen av sprinkler, vattentätheter från sprinkler, ventilationsflöden, brandlarm, tillsatser till vatten, dränering, etc.

I och med det svenska IMPRO-projektet ("Improved water-based fire suppression and drainage systems for ro-ro vehicle decks"), som initierades 2009 med finansiering från bland annat Brandforsk kom flera av ovanstående frågeställningar att utredas [16, 17]. Målsättningen med projektet var att ta fram ett tekniskt underlag för hur ett sprinklersystem för ro-ro däck skall dimensioneras och installeras. Projektets huvudpunkt var fjorton stycken fullskaleförsök där effektiviteten för ett traditionellt vattensprayssystem och ett mer modernt system av typen vattendimma provades i en uppställning som simulerar brand i en lastbilstrailer. Två olika brandscenarier användes, dels ett scenario där branden var fullt exponerad för vattenbegjutning, dels ett scenario där taket över branden förhindrade direkt vattenbegjutning. Det förstnämnda inträffar när kappellet eller taket över ett lastbilssläp brinner av och det sistnämnda om det inte gör det. Försöken genomfördes med olika vattenflöden (vattentäthet), varierande systemtryck och med olika munstycken. Genom att mäta brandeffekten från branden gick det att få ett mycket bra underlag för att bedöma hur effektiva systemen är.

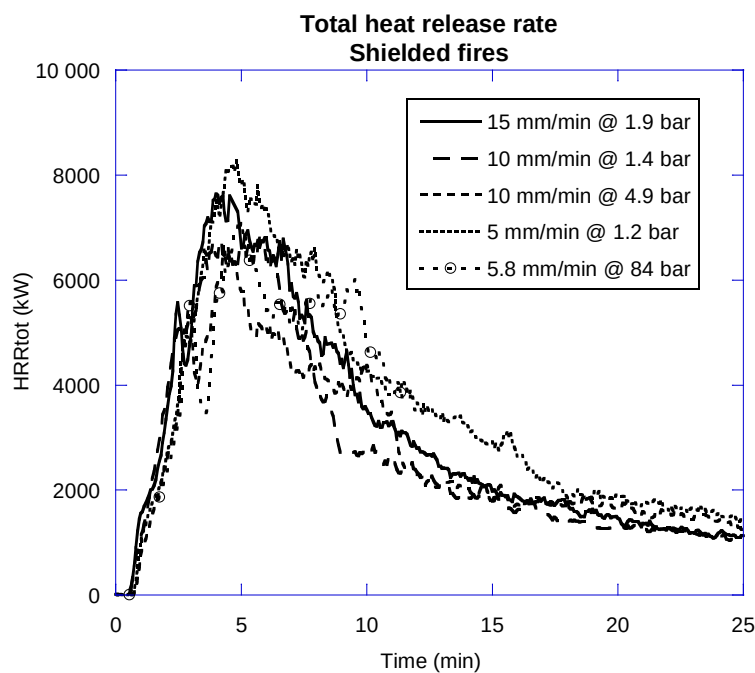
Försöken där branden var fullt exponerad för vattenbegjutning visar att det finns ett klart samband mellan systemets effektivitet och vattentätheten. Vid en vattentäthet motsvarande 15 mm/min ((liter/min)/m²) dämpades branden omedelbart efter det att vattenbegjutningen startat. Vid 10 mm/min dämpades också brandeffekten, men inte lika snabbt. Vid den lägsta vattentätheten motsvarande 5 mm/min kontrollerades branden. Resultaten visar även att ett högre systemtryck och mindre vattendroppar förbättrar effektiviteten. Vattendimsystemet kontrollerade branden vid en vattentäthet om 5.8 mm/min, men 3.75 mm/min respektive 4.6 mm/min visade sig vara för liten

vattenmängd för kontroll av brandförloppet. Högre vattentätheter provades inte. Den uppmätta brandeffekten i försöken visas i figur 5.



Figur 5 Uppmätt brandeffekten när branden var exponerad för direkt vattenpåföring [16].

För brandscenariot där taket över branden förhindrade direkt vattenbegjutning reducerades inte den totala brandeffekten nämnvärt och i princip allt brännbart material förbrukades. Den uppmätta brandeffekten i försöken visas i figur 6. Däremot reducerades den konvektiva brandeffekten, det vill säga de varma brandgaserna kylades.



Figur 6 Uppmätt brandeffekten när branden var dold för direkt vattenpåföring [16].

Slutsatsen från försöken är att det krävs en relativt hög vattentäthet för att dämpa en brand i en lastbilstrailer. Att brandeffekten verkligen reduceras är viktigt för att förhindra eller försvåra brandspridning till närliggande fordon. Det är sannolikt en fördel med större vattendroppar för att de skall transporteras genom brandplym och flamma och kyla den brinnande ytan. Är vattendropparna för små kommer de att transporteras bort från branden eller förångas innan de når den brinnande ytan.

1.4 Tunnelbanevagnar

Passegarutrymmen i tåg-, tunnelbane- eller spårvagnar förses normalt inte med sprinklersystem. Det finns flera anledningar, till exempel; risken för vandalism samt vikten och utrymmesbehovet för pump, vattenbehållare och rörsystem. Marioff Corporation Oy har därför utvecklat ett system för att lösa dessa problem [18]. Systemet är ett så kallat "twin-fluid, single-pipe" system med vatten som släckmedel och trycksatt kvävgas eller tryckluft som atomiserar vattnet i munstycket. Samma rörsystem används för vatten och gas. En elektisk signal krävs för att trycksätta rörsystemet, i normalfallet står vattencylindern och rören inte trycksatta. Man har tre olika alternativa kombinationer av vatten/gas cylindrar, från 20 liter gas och 50 liter vatten till 50 liter gas och 150 liter vatten. För att minska risken för vandalism har systemet så kallade "pop-up" munstycken som är dolda bakom en täckskiva. Vid brandlarm från en värme- och/eller rökdetektor trycksätts rörsystemet och fylls med vatten. Trycket gör att munstyckena skjuts ut så att deras glasbulb exponeras för värmen från en eventuell brand. Systemet är nu "föraktiverat". Munstyckenas täckskivor faller inte till golvet utan hålls kvar av en tunn wire. Glasbulben aktiverar när det når en temperatur om antingen 57°C eller 68°C, beroende på typ av bulb. Antal munstycken som aktiverar beror på brandförloppet, men brandförsök har visat att det är sannolikt att ett munstycke aktiverar om branden är direkt under och två munstycken om branden är mellan två munstycken. Vid aktivering faller även täckskivan ned.

1.5 Fängelseceller

Personer intagna i fängelser kan till skillnad från personer i andra typer av byggnader inte utrymma vid brand på eget initiativ. Det engelska justitiedepartementet (Ministry of Justice) har därför undersökt en brandskyddsfilosofi som inkluderar sprinkler i fängelsecellerna. Normalt finns heller inte något branddetektionssystem i själva cellerna och en brand i cellen detekteras därför antingen av ett system installerat i korridren utanför cellen, av de intagna eller av personalen. Om det brinner i cellen angrips branden med ett strålrör via en mindre öppning i celldörren.

Varje år inträffar ett stort antal bränder på engelska fängelser och många av dem är anlagda. I oktober 2006 trädde nya brandsäkerhetskrav i kraft och justitiedepartementet gav BRE Global i uppdrag att hjälpa till att utveckla en säkerhetsstrategi som inkluderade en studie av möjligheten att använda vattendimma för att skydda cellerna. Man genomförde därför en serie om 21 brandförsök [19] där man provade både fast installerade system och manuell brandsläckningsutrustning enligt nedan:

- Ett traditionellt sprinklersystem med en typ av 'institutionssprinkler' som är särskilt utvecklad för dessa miljöer. Sprinklern är utformad för att försvåra avsiktlig åverkan och det går ej att fästa upp ett rep eller en snara i sprinklern utan att den aktiverar. Vid ett tryck omkring 0.5 bar gav sprinklern 57 liter/minut. Sprinklern monterades på väggen, cirka 125 mm nedanför taket, mitt emot den våningssäng som fanns i cellen.
- En traditionell typ av strålrör som ansluts via slang till en inomhusbrandpost och som riktas in i cellen via en mindre öppning i dörren. Vattenflödet var cirka 30 liter/minut vid 6 bars tryck.

- Olika typer av vattendimmunstycken trycksatta från inomhusbrandpost och som riktas in i cellen via en mindre öppning i dörren.
- Vattendimmunstycken anslutna till en mobil enhet med egen pump.
- Vattendimmsystem installerat i cellen anslutet till ett branddetektionssystem med detektor i cellen som aktiverar munstycket.

För ett fast installerat system i en verklig installation var en viktig utgångspunkt att munstycket inte tillåts installeras i taket. Ett munstycke kan antingen installeras på väggen ovanför celldörren eller på en av cellens sidoväggar. Mobila enheter för manuell brandsläckning behöver ha ett munstycke eller strålrör som kan föras in genom den standardöppning som finns i celldörren. Denna öppning är cirkulär med 45 mm diameter. En annan begränsning är att maximal säkringsklass är 13A och att diesel- eller bensindrivna enheter inte är tillåtna.

Ett försöksrum byggdes med väggar av lättbetong som kläddes invändigt med gipsskivor. Taket bestående av dubbla lager gipsskivor. Rummet var 3 m × 4 m med en takhöjd om 3 m. Den totala volymen var alltså 36 m³. En ”toalett- och duschenhet” byggdes i ett av hörnen invid dörröppningen. Väggarna på denna enhet var 2.85 m höga, det vill säga de nådde inte ända upp till taket. Rummet möblerades med ett standardmöblemang bestående av en våningssäng, en stol och ett skrivbord. Rummet försågs med en standarddörr och ett mekaniskt ventilationssystem med ett ventilationsflöde om 20 liter per sekund.

Brandkällan bestod av ett öppet skåp av trä där man placerade brännbart material såsom kartonger, klädesplagg, pappersrullar, tidningar, CD fodral, ett datortangentbord och sängkläder. Skåpet placerades på den nedre av bäddarna i våningssängen. Placeringen av brandkällan gjorde att den delvis var dold för direkt vattenbegjutning. Varje brandförsök varade 10 minuter efter antändning varefter dörren öppnades under 3 ½ minut för att simulera livräddning. Gastemperaturer, syrekoncentrationen och koncentrationen av toxiska gaser på olika punkter i rummet mättes under 15 minuter. Antändning skedde med en cigarettändare som hölls mot en av kartongerna varefter celldörren stängdes.

Som en referens genomfördes ett försök där branden fick brinna helt fritt i rummet.

BRE Global drog följande slutsatser från försöken:

- Den fribrinnande branden resulterade i ett brandförlopp som var mycket farligt för både eventuella intagna och räddningspersonal. Miljön i form av höga temperaturer och toxiska gaser i cellen blev livshotande efter cirka 10 minuter.
- Brandscenariot var avsiktligt valt för att spegla en besvärlig men typisk brand. De brännbara materialen var dock inte de sämsta tänkbara avseende produktion av toxiska gaser, främst för att mängden plast inte var så stor, som till exempel i en teveapparat.
- Den traditionella ’institutionssprinklern’ hade en K-faktor om 80 (liter/min)/bar^{1/2} och en smältlänk med nominell aktiveringstemperatur om 74°C. Det tog 7 minuter innan den aktiverade och miljön i rummet var relativt sett sämre än i alla övriga släckförsök under de första 15 minuterna efter antändning. Men miljön i rummet var inte sådan att den förorsakar medvetlöshet ens efter 20 minuter.
- Samtliga fasta system som provades klarade minst att kontrollera branden men det var en stor skillnad i prestanda, både vad gäller dämpningen av branden och vad gäller miljön i cellen.
- Samtliga fasta system som provades reducerade effektivt gastemperaturerna i cellen. I vissa av försöken ökade dock temperaturen efter att den initialt dämpats men inte till kritiska nivåer mätt i huvudhöjd.

- Fyra av försöken var av särskilt intresse eftersom vattendistributionsförsök (utan brand) visade att mycket lite vatten nådde fram till brandkällans position. I dessa försök tilltog brandeffekten men dämpades eller släcktes plötsligt efter några minuter. Detta trots att den uppmätta syrekonzentrationen var relativt hög och tillräcklig för att underhålla en brand. Fenomenet berodde sannolikt på att mängden vattenånga i luften¹ ökade när brandeffekten (och därmed temperaturen) ökade och att vattenången dämpade branden. Det här visar att en brand inte kan överskrida en viss storlek i ett rum med begränsad storlek och ventilation om det är ”fyllt” med vattendimma.
- En generell observation från samtliga försök där celldörren var öppen var att siktbarhet i cellen var begränsad eller mycket begränsad. Den begränsade siktbarheten påverkar möjligheten att genomföra personräddning vid en verklig brand. Det noterades också från gasmätningarna att brandgaser trycktes ned mot golvnivå vid aktivering.
- Vattenflödet från de munstycken som provades var mellan 9% till 70% av flödet från den traditionella ’institutionssprinklern’. Systemens effektivitet ökade dock inte nödvändigtvis med ökat vattenflöde. Systemen med lägst vattenflöde var heller inte de mest effektiva att kontrollera branden och kritiska nivåer i cellen.

Följande potentiella problem noterades:

- Det finns risk att munstycken installeras fel eller att de delvis blockeras eller att pumpar inte ger rätt tryck.
- Vattendistributionsförsök (utan brand) visade att tydliga delar av cellens öppna yta inte begöts av vatten alls eller endast av små mängder vatten. Vissa delar av rumsvolymen fylldes inte heller med små vattendroppar. Detta gällde särskilt vattenspraysystemet och systemen med lågt tryck. För högtryckssystemen föreföll det som om hela rumsvolymen fylldes med små vattendroppar. Inga försök genomfördes för att studera om en brand i toalett- och duschenheten skulle kunna dämpas av systemen.
- Flera olika typer av munstycken provades och flera av dem var skenbart robusta mot avsiktlig åverkan och omöjliga att fästa upp ett rep eller en snara i. Andra typer verkade betydligt sämre i dessa avseenden.

Baserat på försöken rekommenderade BRE Global att ett system av typen vattendimma, provat enligt försöken och anslutet till ett branddetektionssystem kan vara ett effektivt sätt att dämpa en brand och åstadkomma en överlevnadsbar miljö i en fängelsecell.

Det visade sig emellertid att en del branddetektionssystem installerade i vissa fängelser inte är tillräckligt tillförlitliga och risken för vattenskada på grund av en felaktivering bedömdes som alltför hög. Sprinklersystem aktiverade av ett branddetektionssystem kommer därför inte att installeras i fängelser under den närmsta framtiden. Alternativa lösningar skulle kunna vara:

- Munstycken som aktiveras av värme från en brand. Tillsammans med ett branddetektionssystem ger det personalen möjlighet att manuellt släcka glödbärare

¹ Vid brandförsök med vattendimma är det vanligt att man mäter syrekonzentrationen i utrymmet. Mätutrustningen kräver att vattenånga filtreras bort med antingen ett filter eller genom att gaserna kyls ned så att vattenången kondenserar. Mätutrustningen mäter därför inte den inverkan (reduktion) som vattenången har på syrekonzentrationen utan endast den sänkning av syrekonzentrationen som fås av brandgaserna, framförallt koldioxid och kolmonoxid. I det här fallet var alltså den uppmätta syrekonzentrationen ”hög” men den verkliga syrekonzentrationen ”låg” tack vare vattenången i luften.

eller bränder som tillväxer långsamt. Nackdelen med dessa munstycken är att de är känsliga för avsiktlig åverkan.

- Manuellt aktiverade vattendimsystem som aktiveras av personalen vid ett brandlarm.
- Ett automatiskt sprinklersystem som är kopplat till ett branddetektionssystem med tvådetektorberoende eller detektorer som kräver flera kriterier för larm. Detta ger åtminstone en skenbar garanti mot felaktivering.

Därför önskade det engelska justitiedepartementet en ytterligare studie fokuserad mot manuella vattendimsystem. I en andra serie försök [20] genomfördes därför åtta försök, där dock två av försöken var med automatiskt aktiverade system. Försöksuppställningen var identisk med den som användes i de tidigare försöken förutom att våningssängen var konstruerad av MDF istället för av metall. Denna typ av sängkonstruktion är säkrare beträffande möjligheten att fästa upp ett rep eller en snara men är ur brandsynpunkt sämre eftersom den är brännbar. Dessutom har den solida gavlar som skärmar vatten från ett strålrör. Följande system provades:

- Ett traditionell typ av strålrör som ansluts via slang till en inomhusbrandpost och som riktas in i cellen via en mindre öppning i dörren. Vattenflödet var cirka 30 liter/minut vid 6 bars tryck.
- Ett vattendimunestycke som kan anslutas via slang till en inomhusbrandpost och som riktas in i cellen via en mindre öppning i dörren. Vattenflödet var cirka 8 liter/minut vid 6 bars tryck.
- Samma munestycke som ovan, men brandkällan var flyttad för att åstadkomma en mer dold brand.
- Ett vattendimmunestycke anslutet via slang till en mobil enhet med egen högtryckspump med en vattentank omkring 35 liter. Vattenflödet var cirka 7 liter/minut vid 110 bars tryck.
- Ett fast installerat högtryckssystem med ett automatiskt munestycke med nominell aktiveringstemperatur om 57°C. Vattenflödet var cirka 14.5 liter/minut vid 100 bars tryck.
- Ett fast installerat lågtryckssystem med två öppna munstycken installerade på en av sidoväggarna. Munstycket aktiverades när ett termoelement i taket indikerade att temperaturen ökade med mer än 2°C per minut. Vattenflödet var cirka 2 × 8 liter/minut vid 5 bars tryck.
- Ett "twin-fluid" munestycke anslutet via slang till antingen en bärbar vatten- och tryckluftsbehållare med 9 liters vattenkapacitet eller mobil enhet med 50 liters vattenkapacitet. Munstycket gav en mycket finfördelad vattenspray med droppar omkring 25 µm. Vattenflödet mättes ej.
- Ett "twin-fluid" munestycke anslutet via två slangar (vatten och luft) till en inomhusbrandpost för vattnet och till en tryckluftsbehållare för tryckluft. Vattenflödet var cirka 6 liter vid 4 bars tryck och luftflödet cirka 3 m³/minut vid 3 bars tryck. Enligt tillverkaren består vattensprayen av droppar i storleksordningen 40 µm.

Som en referens genomfördes även här ett försök där branden fick brinna helt fritt i rummet.

Slutsatsen från försöken var att alla system som provades kontrollerade branden och den kritiska miljön i cellen jämfört med den fribrinnande branden. Men det var stor skillnad i prestanda mellan de olika systemen. Samtliga system reducerade effektivt gastemperaturen i cellen men i några fall steg temperaturen under försökets gång. En generell observation från samtliga försök där celldörren var öppen var att siktbarhet i cellen var begränsad eller mycket begränsad. Den begränsade siktbarheten påverkar möjligheten att genomföra personräddning vid en verklig brand. Man observerade återigen att brandgaser trycktes ned mot golvnivå av systemen.

Försöken visade även att sängkonstruktionen är olämplig eftersom den tillför brandbelastning, vikten var omkring 100 kg, och dess solida gavlar skärmade vatten från ett strålrör eller en sprinkler.

Vattenflödet från de strålrör och munstycken som provades varierade mellan 20% (6 liter/minut) och 53% (16 liter/minut) av det flöde som ett standardstrålrör som används i fängelser (cirka 30 liter/minut vid 6 bar) ger. Trots detta klarade alltså systemen att dämpa branden och förhindra att en kritisk miljö i cellen uppstod.

Systemet med ett "twin-fluid" munstycke anslutet via slang till antingen en bärbar vatten- och tryckluftsbehållare och som gav de minsta vattendropparna (omkring 25 µm) klarade inte att dämpa branden och miljön i cellen var inte överlevnadsbar för vare sig en intagen eller för räddningspersonal.

Det fast installerade högtryckssystemet med ett munstycke som aktiverades av värmen från branden klarade att effektivt dämpa branden och förhindra att en kritisk miljö i cellen uppstod. Ett brandscenario som tillväxer långsammare eller en glödbbrand som producerar toxiska gaser men för lite värme för att aktivera systemet kan vara kritiskt. Även det fast installerade lågtryckssystemet var effektivt men har motsvarande frågeställningar. Den pratiska möjligheten att installera ett termoelement i taket är heller inte utrett.

Baserat på de båda försöksserierna rekommenderade BRE Global det engelska justitiedepartementet följande:

- Justitiedepartementet bör överväga att välja ett vattendimmsystem för manuell brandsläckning som är provat och påvisats effektivt mot brand i fängelseceller. Försöken visar ett såväl lågtryckssystem, högtryckssystem som andra typer av system är effektiva att dämpa en brand och att förhindra att en livshotande förhållanden för såväl den intagne som räddningspersonalen uppstår.
- Justitiedepartementet bör överväga att välja ett fast installerat och automatiskt sprinklersystem som är provat och påvisats effektivt mot brand i fängelseceller. Mer kunskap krävs dock avseende långsamt tillväxande bränder och glödbbränder eller brand som producerar stora mängder toxiska brandgaser men lite värme och hur detta påverkar miljön i cellen.
- Justitiedepartementet bör överväga brandsäkerhetsaspekterna med möbler utförda i MDF.
- Justitiedepartementet bör överväga hur en dämpad brand påverkar effektiviteten för system för brandgasventilation.

1.6 Undertak- och övergolvsutrymmen

VdS Schadenverhütung har publicerat flera brandprovningmetoder för vattendimma. En av dessa är en brandprovningmetod för system installerade i undertak- och övergolvsutrymmen [21] i verksamheter som klassas som OH1.

Försökuppställningen består av en undre och en övre kabelstege med elkablar. Det vertikala avståndet mellan kabelstegen är 300 mm. Kabelstegen är placerade nära en vägg av plywood och under ett längsgående tak som är placerat 300 mm ovanför den övre kabelstegen. Systemet som provas skall installeras mellan den övre kabelstegen och taket ovanför. Kraven i provningmetoden bygger på att det system som provas skall ha en effektivitet som är jämförbar med traditionella sprinkler. Därför utförs först försök med sprinkler där gastemperaturen i taket ovanför branden och i en del andra mätpunkter mäts med termoelement. Dessutom skall en visuell bedömning av brandskadorna, både i

elkablarna och i plywooden göras. Sprinklerna är installerade med ett horisontellt avstånd om 3.0 m. Systemet dimensioneras för 0.56 bar, vilket motsvarar 60 liter/minut per sprinkler. Branden i elkablarna initieras med en 200 mm × 200 mm balja som fylls med 120 ml heptan och som placeras under den nedre kabelstegen. Antändningskällan skall vara mellan två stycken munstycken och det vertikala avståndet mellan antändningskällan och taket är 800 mm.

Vattendimsystemet som provas tillåts att installeras med större avstånd mellan munstyckena än sprinklersystemet. Typiskt är att dessa system har glasbulber med lägre nominell aktiveringstemperatur och lägre RTI-värde än de traditionella sprinklerna. Munstycken aktiveras därför i ett tidigare skede av brandförloppet även om avståndet mellan munstyckena är längre. Ett lyckat resultat medger godkännande för installation i undertak- och övergolvstrymmen som är mellan 300 mm och 800 mm höga.

Utöver försöken med det traditionella sprinklersystemet och det vattendimsystem som provas görs ett fribrinnande försök. Nedan redovisas resultat från två olika försöksserier genomförda enligt ovanstående brandprovningsmetod.

1.6.1 Försök med högtryckssystem

Dessa försök gjordes med att vattendimsystem dimensionerat med 60 bars tryck. Munstyckena installerades uppåtriktade med ett större horisontellt avstånd jämfört med sprinklersystemet. Figur 7 visar brandskadorna efter ett försök med det traditionella sprinklersystemet och figur 8 brandskadorna efter ett försök med högtryckssystemet.



Figur 7 Brandskadorna efter ett försök med det traditionella sprinklersystemet (referensförsök). Foto publicerat med benäget tillstånd av tillverkaren.



Figur 8 Brandskadorna efter ett försök med högtryckssystemet. Foto publicerat med benäget tillstånd av tillverkaren.

Resultaten visade att vattendimsystemet var jämförbart eller bättre än det traditionella sprinklersystemet men med ett vattenflöde som var betydligt lägre.

1.6.2 Försök med lågtryckssystem

Dessa försök gjordes vid SP Fire Research med ett vattendimsystem dimensionerat med cirka 7 bars tryck. Munstycken var installerade uppåtriktade och avståndet mellan munstycken var längre än för det traditionella sprinklersystemet. Resultaten visade att vattendimsystemet var jämförbart med det traditionella sprinklersystemet med ett vattenflöde som var ungefär en tredjedel av det för sprinklersystemet. Figur 9 visar branden när två munstycken aktiverat i ett av försöken och figur 10 brandskadorna efter att försöket avslutats.



Figur 9 Branden strax efter att två munstycken aktiverat i ett försök med ett lågtryckssystem. Foto publicerat med benäget tillstånd av tillverkaren.



Figur 10 Brandskadorna i en försöksuppställning som simulerar undertak- och övergolvsutrymmen efter ett försök med ett lågtryckssystem. Foto publicerat med benäget tillstånd av tillverkaren.

Resultaten visade att vattendimsystemet var jämförbart eller bättre än det traditionella sprinklersystemet men med ett vattenflöde som var betydligt lägre.

2 Ny teknik

2.1 NanoMist®

Atomisering av vatten till mycket små vattendroppar, i storleksordningen $10\ \mu\text{m}$ och mindre, kräver mycket energi eller specialteknik. Vattendropparna förångas mycket snabbt och den totala kontaktytan mellan droppar och omgivande gasmassa är stor.

NanoMist® är ett system där vattendropparna alstras i en generator med en patenterad teknik bestående av bland annat en oscillerande platta. Jämfört med ett system med hydraulisk sönderdelning av vattnet är vattendropparna betydligt mindre, i storleksordningen mindre än $10\ \mu\text{m}$ jämfört med $50 - 150\ \mu\text{m}$. Detta innebär att vattendropparna får fysikaliska egenskaper som liknar en gas. De följer luftströmmar och kan distribueras runt obstruktioner. En generator visas i figur 11.



Figur 11 En NanoMist® generator [22].

Vattendropparnas totala omslutningsarea är dessutom mycket stor liksom dess kylförmåga. I princip kan all förångningsvärme för vattnet utnyttjas och släckning är momentan så snart släckande koncentration uppnåtts. Vattenmängderna är därför mycket små vilket begränsar risken för vattenskador. Enligt tillverkaren är dimensionerande släckkoncentration $0.2\ \text{liter/m}^3$ och försök visar att det tar några minuter innan ett rum är så fyllt med vattendroppar att man når denna koncentration [22].

Systemet har provats i en försöksuppställning som speglar ett övergolv i till exempel en datorhall. Brandförsök genomfördes med små heptanbränder ("telldales") placerade bakom en skiva som fungerade som en obstruktion. Systemet släckte bränderna efter cirka 3 minuter när vattenflödet var $0.053\ (\text{liter/min})/\text{m}^2$. När man använde ett något lägre vattenflöde var tiden till släckning 8.5 minuter. Man genomförde även miljötålighetstest där man exponerade ett elektronikkort för vattendimma. Elektronikkortet fungerade i mer än 7 minuter efter att NanoMist® systemet aktiverats [23].

2.2 System som kombinerar kvävgas och vattendimma

De senaste åren har flera tillverkare lanserat system som kombinerar vattendimma och inertgas, vanligen kvävgas. Kvävgasen har flera funktioner, dels används den som en drivgas för att trycka vattnet från ett tryckkärl ut i systemets rör, dels används den för att sönderdela vattnet till mycket små vattendroppar vid munstycket och slutligen bidrar den till släckeffektiviteten genom att syrekonzentrationen i utrymmet reduceras.

Systemen har i första hand utvecklats för skydd av utrymmen med gasturbiner, mindre maskinrum och liknande risker där pool- eller spraybrand kan uppstå i bränsle-, smörj- eller hydrauloljesystem.

Systemens arbetstryck är förhållandevis låga och systemtrycket är konstant under hela utströmningsfasen. Jämfört med ett rent inertgassystem är utströmningstiden betydligt längre, upp mot 10 minuter jämfört med cirka 60 sekunder. Det gör att 'släckande koncentration' byggs upp långsammare i utrymmet men också att tryckuppbyggnaden blir lägre. Hastigheten genom munstyckena är hög och omblandningen i det skyddade utrymmet är mycket god.

Jämfört med ett system med hydraulisk sönderdelning av vattnet är vattendropparna betydligt mindre, i storleksordningen 10 µm jämfört med 50 – 150 µm och vattnets förångningsvärme kan utnyttjas nästan maximalt. Vattenmängderna är mycket små vilket begränsar risken för vattenskador.

Idag finns minst tre olika system på marknaden och i nedanstående tabell jämförs några viktiga parametrar. De två förstnämnda systemen är utvecklade av amerikanska företag, det tredje är utvecklat av ett polsk företag.

Tabell 1 Tre kommersiella system som kombinerar vattendimma och kvävgas. Informationen är hämtad från tillverkarnas datablad.

	TYCO AQUASONIC™	Victaulic Vortex™	Telesto
Systemtryck (vatten)	8.6 bar	1.7 bar	3 bar
Systemtryck (kvävgas)	8.6 bar	0.07 – 0.34 bar	3 bar
Gasflöde per munstycke	--	4.25 m ³ /min	--
Maximal skyddad rumsvolym	1040 m ³	3600 m ³	80 m ³
Täckningsyta munstycke	104 - 130 m ²	70 m ²	20 m ²
Vattenflöde per munstycke	8.3 – 10.2 liter /min	3.78 liter/min	5.5 liter /min
Vattenflöde per volymenhet	0.044 liter /min/m ³	0.054 liter /min/m ³	0.275 liter /min/m ³

Enligt uppgift från en tillverkare (TYCO) reduceras syrenivå i ett skyddat utrymme till omkring 15 vol% efter tio minuters påföring av kvävgasen. Normalt släcks dock något större bränder inom några minuter. De uppger även att siktbarheten under utströmningen är relativt god. Sammantaget bidrar dessa faktorer till att personsäkerhetsriskerna är låga.

Systemen från TYCO och Victaulic är provade och certifierade av FM Global och en fördel jämfört med rena gassläcksystem är att utrymmet inte behöver vara helt tätt. Vid brandprovningen är en gångdörr öppen till försöksrummet.

2.3 AutoMist

Brittisk statistik visar att omkring 60% till 65% av alla bostadsbränder startar i köket. Det engelska företaget Plumis Ltd har lanserat AutoMist, ett brandskydd utformat för att integreras i bostäder och som ett billigare alternativ till traditionella sprinkler. Systemet

består av en eller flera värmedetektorer som via en brandlarmcentral är kopplad till en högtryckspump till vilken en eller flera munstycken ansluts.

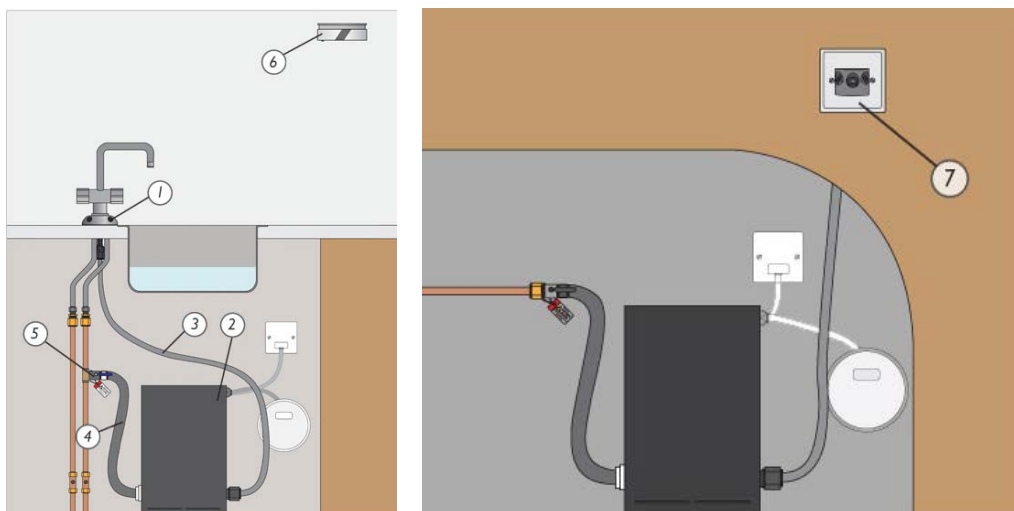
För en diskret installation kan ett munstycke integreras i kökskranen, placeras på en köksbänk eller väggmonteras, se figur 12. Företaget menar därmed att man täcker en bostads högriskområden. Munstycken för väggmontage installeras mellan 600 mm till 1100 mm över golvet och riktas mot brandriskområdet.

Ett munstycke ger 5.3 liter/minut vid 80 bars tryck och skall installeras så att det är riktat mot och inom 5 m från det potentiella brandriskområdet.



Figur 12 Placering av munstycken för AutoMist systemet, antingen integrerat i köksblandaren, placerat på köksbänk eller väggmonterat. Foton publicerade med benäget tillstånd av Plumis Ltd.

Högtryckspumpen kan placeras under diskbänken och ansluts direkt till tappvattnet. Pumpen har måtten 385 mm (L) × 216 mm (L) × 151 mm (W) och väger 11.2 kg. Kallvattennätet behöver ha en kapacitet om minst 6 liter/minut vid mellan 1 till 10 bar. Pumpen kräver 1.7 kW, 230 V och 50 Hz elmatning. Figur 13 visar hur systemet installeras med högtryckspumpen i skåpet under en diskbänk, med ett munstycke integrerat i köksblandaren eller med ett väggmonterat munstycke i rummet.



Figur 13 Installation av högtryckspumpen i skåpet under en diskbänk med ett munstycke integrerat i köksblandaren eller väggmonterat. Illustrationer publicerade med benäget tillstånd av Plumis Ltd.

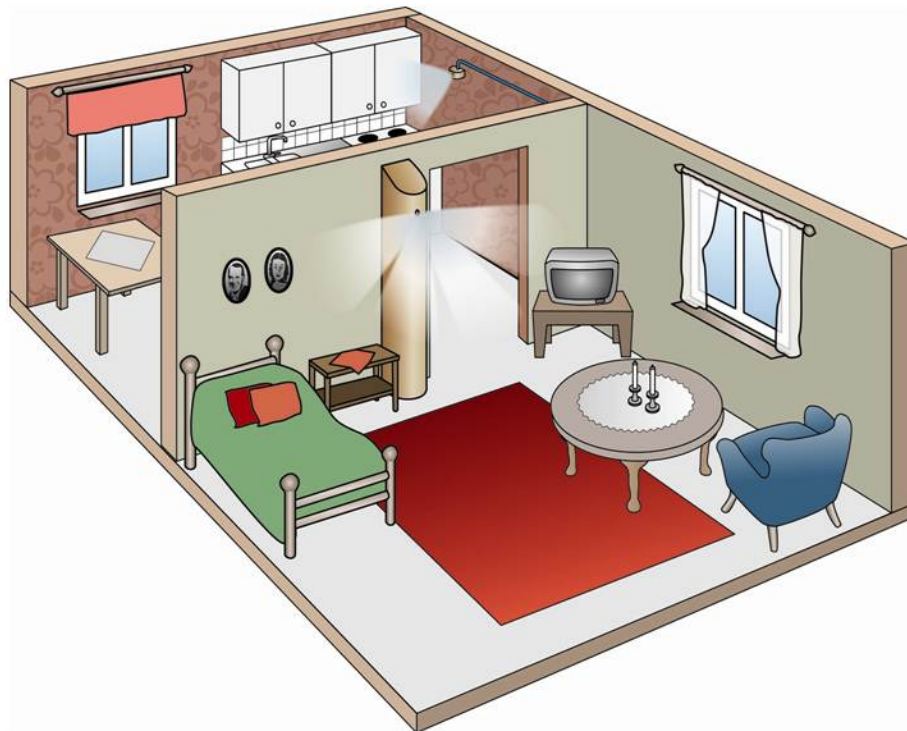
Normalt är systemet aktiverat i 30 minuter och stängs sedan av men kortare eller längre varaktighet kan programmeras i brandlarmcentralen.

Systemet har brandprovats av BRE Global där man demonstrerat att systemet kan åstadkomma en överlevnadsbar miljö i termer av att brandgastemperaturen i rummet såväl som koncentration av toxiska gaser begränsas. De brandkällor som användes vid försöken hämtades från DD8458-1 (utkast till vattendimstandard) och BS EN 1869 (standard för provning av brandfilter). Dessa brandkällor speglar brand i stoppade möbler respektive brand i kokkärl. Systemet uppfyller dock formellt inte kraven i provningsstandarderna.

2.4 Q-FOG

Q-FOG är ett svenskutvecklat system för befintliga boendemiljöer där det finns ett ökat behov av brandskydd, till exempel för äldre, dementa eller handikappade i vårdboenden eller hemmiljö, se figur 14.

Systemet består av en enhet som innehåller en 130 liters vattentank, en högttryckspump, en brandlarmcentral och ett integrerat vattendimmunstycke. Enheten är flyttbar, utan vatten väger den cirka 65 kg och kopplas till elnätet (230 V). Systemet aktiveras av en separat rök- och värmedetektor. Vattenmängden är tillräcklig för 15 minuters varaktighet. Extra munstycken, till exempel ovanför särskilda brandriskområden som spis eller säng eller i anslutande rum kan kopplas till enheten.



Figur 14 **Principiell installation av Q-FOG i ett rum. Illustrationen publicerad med benäget tillstånd av Q-FOG i Nora AB.**

Systemet har utvärderat i brandförsök i enlighet med dokumentet ”Lätt monterbara automatiska släcksystem” [24] som har tagits fram av det norska Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap och Myndigheten för Samhällskydd och Beredskap. Flera fall finns dokumenterade där systemet aktiverat och troligen förhindrat dödsbränder [25].

3 Utveckling av befintlig teknik

3.1 Munstycken för fängelseceller

Ultra Fog AB har utvecklat en typ av munstycke för fängelseceller eller vårdrum där intagna är självmords- eller självskadebenägna [26], se figur 15. Munstycket är försett med en glasbulb och är konstruerat så att det svårt att skruva isär och det går inte att fästa upp ett rep eller snara i det. Om hållaren för glasbulben utsätts för en last om 150 N (cirka 15 kg) aktiverar munstycket. Munstycket kan monteras i tak eller på vägg.



Figur 15 Munstycke konstruerat för försvåra överkan och för att aktivera om det används som fästpunkt för rep eller snara. Foto publicerat med benäget tillstånd av Ultra Fog AB.

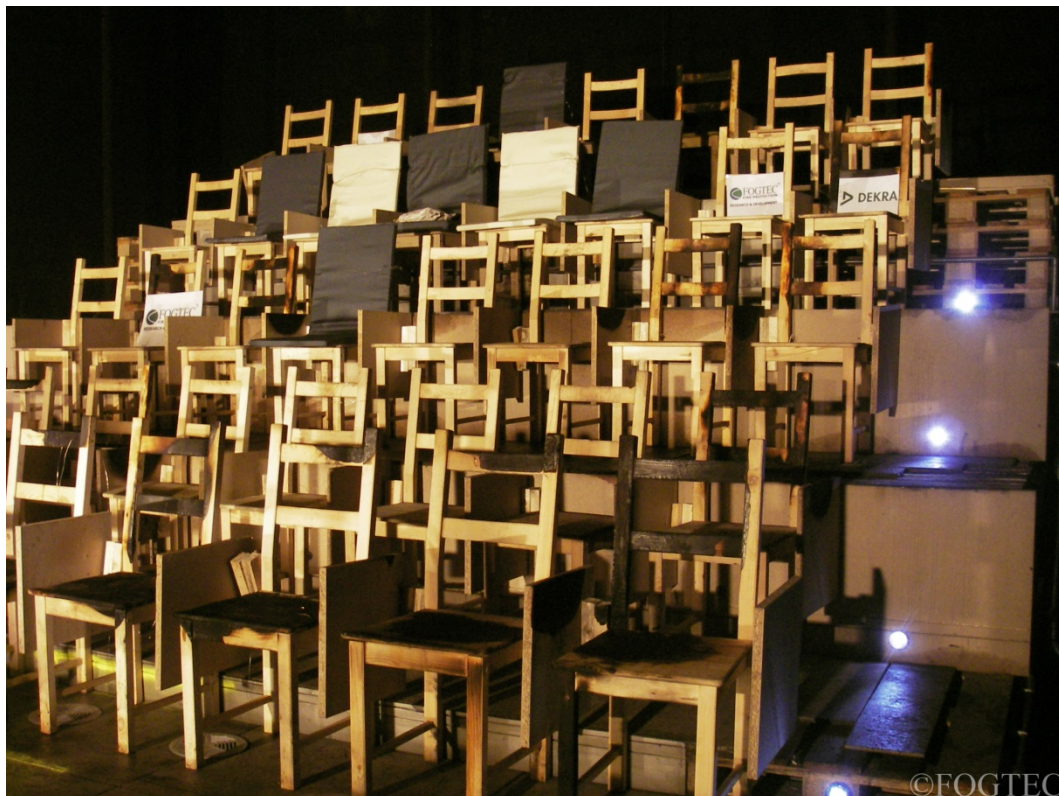
Munstycket har brandprovats av BRE Global i en försöksuppställning nästan identisk med den som beskrivs kapitel 1.5 förutom att rummet byggdes av gipsskivor på träreglar och att koncentrationen av toxiska gaser inte mättes [27]. Munstycket installerade i en av sidoväggarna, 220 mm under taket. Vattenflödet var omkring 8 liter/minut vid 100 bars tryck. Försöken visade att munstycket reducerade gastemperaturen i cellen till låga nivåer. Man bedömde att det motsvarar en överlevnadsbar miljö även avseende toxiska gaser.

3.2 Golvmonterade munstycken

3.2.1 Munstycken för skydd av auditorium

Fogtec Brandschutz GmbH & Co. KG har utvecklat och brandprovat ett pop-up munstycke för en konserhall i Elbphilharmonie [28]. Byggnaden är ett konserthus som är ritad av den schweiziska arkitektfirman Herzog & de Meuron och byggs i Hamburgs nya centrala stadsdel Hafencity. Den totala byggnadsarean är 120 000 m² och byggnaden är 110 m hög. Den största konserthallen har sittplatser för 2150 personer och har en takhöjd

om 25 m. Det finns även två mindre konserlokaler, ett hotell med restaurang, 45 bostadslägenheter och en utsiktsplats med 360° panoramavy. I samtliga lokaler, inklusive parkeringsgarage, skall traditionella sprinkler installeras. På grund av den höga takhöjden bedömdes att sprinkler inte var ett bra alternativ i den största konserthallen. Här krävdes istället en innovativ lösning. Tillsammans med projektet brandskyddskonsult togs ett fullskalescenario fram som var så verklighetstrogen som möjligt vad gäller brandbelastning och ventilation, se figur 16.



Figur 16 Försöksuppställning för prov av munstycken för skydd av auditorium. Foto publicerat med benäget tillstånd av FOGTEC Brandschutz GmbH & Co. KG.

Eftersom den huvudsakliga brandbelastningen är i golvnivå, framförallt bestående av de rader av säten som placeras på avsats, var utgångspunkten att sprinklersystemet skulle monteras i golvnivå. Tidig detektion av brand bedömdes också var avgörande för ett bra brandskydd. Försöksuppställningen bestod av sex rader med vardera åtta stycken säten. Det vertikala avståndet mellan varje rad var mellan 14 cm och 60 cm och den totala höjden 2.4 m. Takhöjden över uppställningen var 5 m, alltså betydligt lägre än i den verkliga konserthallen. Säten utgjordes av vanliga trästolar med en extra stoppning av PU-skum. Tre olika branddetektionssystem provades; ett aspirerande system med detektionsrören placerade vid varje avsats, värmedetektionskabel som också placerades vid varje avsats och optiska rökdetektorer som placerades i taket, som alltså var 20 m lägre än den verkliga konserthallen. Vid förförsök som genomfördes detekterade det aspirerande systemet branden efter 05:30 [min:s], värmedetektionskabeln efter 01:51 [min:s] och de optiska rökdetektorerna efter 01:31 [min:s]. Baserat på dessa resultat ansågs systemet med värmedetektionskabel var det mest lämpliga eftersom det detekterade branden snabbt och har hög precision angående var branden är lokaliserad. Vid de brandförsöken ansattes en förbrinntid om 3 minuter för att ge en viss säkerhetsmarginal.

Dolda munstycken, så kallade "pop-up" munstycken, installerades i golvet på varje avsats, se figur 17. Flödet från munstycken motsvarade en vattentäthet om 1.2 mm/min.



Figur 17 De dolda munstycken, så kallade ”pop-up” munstycken, som användes vid försöken. Foton publicerade med benäget tillstånd av FOGTEC Brandschutz GmbH & Co. KG.

Resultaten visade att gastemperaturerna i brandens direkta närhet effektivt kontrollerades och att brandspridningen var begränsad. Ventilationen i försöksrummet hade dessutom begränsad påverkan på resultaten.

För det verkliga systemet var målsättningen att systemet skulle kunna kontrollera en brand tills räddningstjänsten kan påbörja manuell släckning. Systemets pump dimensionerades för en kapacitet som klarar samtidig aktivering av tre sektioner. Tillförlitligheten och säkerhetsaspekterna för täcklocket för munstyckena analyserades. Bland annat visades att locket riskerar inte att ge personskada vid aktivering och en eventuell väska eller annat mindre objekt som placeras över munstyckena kommer att flyttas vid aktivering.

3.2.2 Munstycken för skydd av flygplanshangarer (lågtryckssystem)

I hangarer för flygplan är den primära brandrisken bränslespill på hangargolvet. Det är vanligt med lättskumssystem i hangarer men det kräver att utrymmet fylls med skum. Ett annat alternativ är takmonterade vattenspray- eller skummunstycken men en flygplanskropp och vingarna skärmar vattensprayen från att träffa ett spill som rinner under ett flygplan.

Flera företag har därför tagit fram så kallade ”pop-up” munstycken som installeras i golvet, ett sådant exempel beskrivs i referens [29]. Systemet är utvecklat av det danska företaget VID Fire-Kill ApS. Målsättningen med det koncept som togs fram var att snabbt slå ned en spillbrand. För att uppnå snabb aktivering används flamdetektorer och systemet är uppdelat i sektioner som motsvarar en uppställningsplats för ett flygplan. Ofta innebär service och underhåll av flygplanen att elektrisk utrustning, elkablar och anslutningar är direkt exponerade. Inblandning av skumvätska, till exempel AFFF, är därför vanligtvis inte önskvärt. Vanliga flygbränslen är JP-8 eller andra kolväten. Eftersom hangarer ofta är mycket stora är den primära släckmekanismen därför direkt kylning av bränslet och inte förångning av vattnet och inertering med vattenånga.

Munstyckena och rörsystemet är antingen integrerade i golvet eller i förhöjningar som omgärdar uppställningsplatsen. Vattentrycket i systemet är minst 8 bar vilket gör att munstycket skjuter upp 150 mm över golvytan vid aktivering och distribuerar vattendimma runt flygplanet. Munstyckena installeras med en horisontellt avstånd om 7 m × 1.5 m och den dimensionerande vattentätheten är 5.6 mm/min. Brandförsök både i brandhallar och riktiga hangarer har visat att en spillbrand snabbt dämpas ned och

kylningen runt branden är effektiv. För att förbättra brandskyddet väljer ofta slutanvändare att även installera takmunstycken över och runt uppställningsplatser. Figur 18 visar ett munstycke och ett distributionsförsök i en hangar.



Figur 18 Munstycke för dämpning och släckning av spillbränder i flygplanshangarer. Foton publicerade med benäget tillstånd av VID Fire-Kill ApS.

3.2.3 Munstycken för skydd av flygplanshangarer (högtryckssystem)

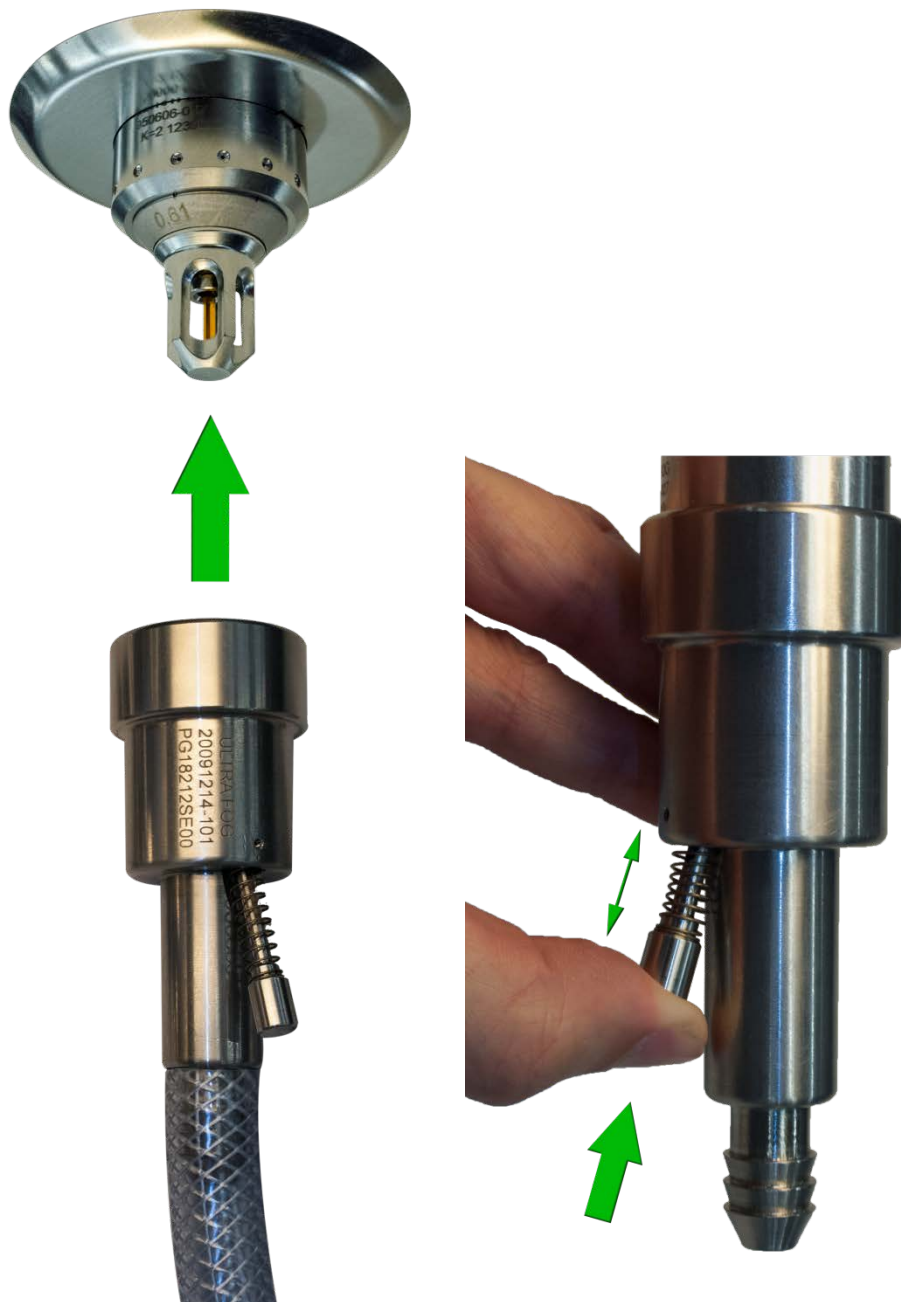
Marioff Corporation Oy har utvecklat ett högtryckssystem med pop-up munstycken för att skydda flygplan i hangarer [30]. Systemet har provats vid det norska brandlaboratoriet i en försöksuppställning som inkluderade en mock-up av ett F-16 militärflygplan. Spillbränder med JP8 flygbränsle eller heptan anlades under flygplanskroppen och vingarna. Förbrinntiderna var antingen 10 sekunder, 30 sekunder eller 70 sekunder för att simulera olika sofistikerade branddetektionssystem. I de flesta försöken släcktes bränderna och vid alla försök dämpades branden så att ytemperaturen i flygplanet begränsades till den nivå den nådde under förbrinntiden.

Systemet dimensioneras för 75 bar vattentryck med $K=2.1$ munstycken som täcker maximalt $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$. Detta motsvarar ett flöde per munstycke om 18.2 liter/minut och en vattentäthet omkring 2.9 mm/min. För att ytterligare förbättra brandskyddet rekommenderar Marioff att takmunstycken även installeras över och runt uppställningsplatser.

3.3 Teknik för avluftning av system och provning av munstycke

3.3.1 Teknik för högtryckssystem

Ultra Fog AB har tagit fram ett verktyg för att både avlufta system och för att prova ett enskilt munstycke [26], se figur 19. Verktöget monteras över ett installerat munstycke och med en tryckstång går det att trycka tillbaka spindeln i munstycket så att eventuell luft (i rörsystemet) och vatten strömmar ut genom munstycksöppningarna utan att glasbulben har aktiverat. I änden på verktöget finns en slanganslutning för att leda bort vatten.



Figur 19 Verktog för att avlufta system och prova för att prova ett enskilt munstycke. Foton publicerade med benäget tillstånd av Ultra Fog AB.

Med hjälp av verktyget går det alltså att avlufta systemet, kontrollera att rätt vattenflöde erhålls, kontrollera munstyckets K-faktor och tappa av vatten för att kontrollera vattenkvaliteten utan att munstycket förstörs.

3.3.2 Teknik för lågtryckssystem

Prevent Systems AS har automatiska munstycken (med glasbulb) där det är enkelt att avlufta systemet via munstycket med hjälp av ett verktyg. Det är också möjligt att byta glasbulb utan att munstycket demonteras.

4 Installationsregler och provningsmetoder

4.1 National Fire Protection Association (NFPA)

År 1993 påbörjade NFPA arbetet med en rekommendation för vattendimma som fick namnet NFPA 750. Den första utgåvan publicerades 1996 och reviderade utgåvor har publicerats 2000, 2003, 2006 och 2010. Den sjätte utgåvan är planerad till 2014.

Dokumentet innehåller minimikrav på dimensionering, installation, underhåll och provning av system för vattendimma. Däremot innehåller det inte skyddsmål eller specifika anvisningar för hur ett visst system skall utföras för att kontrollera, dämpa eller släcka en brand. Grundmodellen för NFPA 750 är att den skall gynna funktionsbaserad och innovativ tillämpning av system. Vissa potentiella slutanvändare anser att dokumentet inte är en "installationsstandard" på samma sätt som till exempel NFPA 13, där det mesta nödvändigt för att utföra en installation beskrivs i detalj. NFPA 750 behöver i högre grad kompletteras med information som är specifik och tillhandahålls av den enskilda tillverkaren eller leverantören. Till viss del har detta försenat en bred acceptans för tekniken [31]. Det är i sammanhanget dessutom viktigt att erinra att NFPA som organisation varken godkänner eller inspekterar några produkter eller installationer. Detta ansvar åligger varje berörd myndighet eller godkännandeorgan.

Den första utgåvan av NFPA 750 definierar vattendimma som en vattenspray där 99% av det kumulativa volymsflödet utgörs av vattendroppar mindre än 1000 µm (1 mm). I den andra utgåvan finns beskrivet hur och var i vattenspraken droppstorleksfördelningen skall mätas. I den andra utgåvan utökades även definitionen till att även omfatta munstycken som producerar större vattendroppar, men har påvisats fylla de krav som finns i vedertagna provningsmetoder för vattendimma.

4.2 Underwriters Laboratories (UL)

UL är en oberoende, ideell organisation som provar och certifierar produkter med avseende på dess säkerhet. UL har sitt säte i USA men har dotterbolag över hela världen. Inom brandområdet provar och certifierar man bland annat byggnadskonstruktioner, ytskikt, släcksystem, släckmedel, sprinkler, skumvätskor och pumpar.

UL 2167, "Water Mist Nozzles for Fire Protection Service" [32], publicerades i sin första utgåva 2002 och revideras löpande. Standarden innehåller komponent- och brandprovningsmetoder för munstycken. Man provar och certifierar alltså inte kompletta system utan endast munstycket. Stora delar av dokumentet är baserat på brandprovningsmetoder från International Maritime Organization (IMO) och därför är brandscenarierna, acceptanskriterierna och komponentproven mer eller mindre identiska. Andra delar av dokumentet bygger vidare på tidigare UL standarder för sprinkler och boendesprinkler. Följande brandprovningsmetoder ingår (originaltitel inom parentes):

- Maskinrum på fartyg (Shipboard Machinery Space Fire Tests).
- Passagerarhytter på fartyg (Shipboard Passenger Cabin Fire Tests).
- Passagerarhytter större än 12 m² på fartyg (Shipboard Passenger Cabins greater than 12 m²).
- Publika lokaler på fartyg (Shipboard Public Space Fire Tests).
- Boendemiljöer (Residential Area Fire Tests).
- Låg riskklass (Light Hazard Area Fire Tests).
- Normal riskklass, grupp 1 (Ordinary Hazard Group 1 Fire Tests).
- Normal riskklass, grupp 2 (Ordinary Hazard Group 2 Fire Tests).

Följande komponentprovningssmetoder ingår (originaltitel inom parentes):

- Miljöexponering av munstycken med polymera packningar (Exposure Tests on Nozzles Incorporating Polymeric Gaskets).
- Verifiering av korrekt färg på glasbulb (Nominal Operating Temperatures).
- Bestämning av nominell aktiveringstemperatur (Operating Temperature Test).
- Bestämning av flödeskoefficient (Water Flow Test).
- Vattendistributionsförsök (Water Distribution Test).
- Bestämning av vattendroppstorlek och hastighet (Water Droplet Size and Velocity).
- Funktionsprov (Function Test).
- Prov av spridarplatta/munstycksöppning (Deflector/Orifice Assembly Test).
- Hållfasthet hos munstyckskropp (Body Strength Test).
- Hållfasthet hos glasbulb (Strength of Glass Bulb Elements).
- Hållfasthet hos smältlänk (Strength of Fusible Elements).
- Täthetsprovning (Leak Resistance).
- Hydrostatisk hållfasthet (Hydrostatic Strength).
- Värmeexponering (Heat Exposure).
- Värmechock (Thermal Shock).
- Korrosionsprovning (Corrosion Tests).
- Provning av ytbeläggning (Integrity of Nozzle Coatings).
- Tryckstötsprovning (Water Hammer).
- Bestämning av RTI- och C-värde (Dynamic Heating, Plunge Test, Prolonged Plunge Test).
- Värmebeständighet (Heat Resistance).
- Vibrationsprovning (Vibration).
- Ovarsam hantering (Rough Usage Test).
- Fallprov (Impact Test).
- Kylning av andra munstycken (Lateral Discharge).
- Täthetsprovning i 30 dagar (Thirty-Day Leakage Resistance).
- Täthetsprovning med vakuum (Vacuum Resistance).
- Igensättningsprovning (Clogging Test).
- Frysprovning (Freezing Test).

4.3 FM Approvals

FM Approvals certifierar industriella och kommersiella produkter och tjänster för företag världen över. När en produkt eller tjänst uppfyller kraven kan den märkas med "FM APPROVED". Man har två stycken omfattande standarder; för traditionella vattendimsystem gäller FM 5560, och för system som kombinerar vattendimma och kvävgas eller någon annan inertgas, FM 5580.

4.3.1 FM 5560

FM 5560, "Approval Standard for Water Mist Systems" publicerades i sin första utgåva 2005 och i en andra reviderad utgåva 2012 [33]. Standarden omfattar provningsmetoder för systemkomponenter, systemet samt brandprovningssmetoder. Standarden innehåller även märkningskrav samt krav på tillverkningskontroll, kvalitetssäkring samt uppföljning. Utöver de krav som ställs i godkännandet skall system installeras i enlighet med bland annat FM Global Property Loss Prevention Data Sheet Number 4-2, "Water Mist Systems", 7-79, "Fire Protection for Combustion Turbine Installations", 7-20, "Oil

Cookers”, 3-26, ”Fire Protection Water Demand for Nonstorage Sprinklered Properties” och 7-7, ”Semiconductor Fabrication Facilities”.

FM Approvals hanterar varje system som unikt och kraven på systemkomponenter i FM 5560 skall därför ses som riktlinjer. Omfattningen av provningarna avgörs från fall till fall. Vid förfrågan från en uppdragsgivare granskar man systemets komponenter och systemets uppbyggnad och ett anpassat utvärderingsprogram tas fram. Brandprovningssmetoderna är generiska och gäller för samtliga typer av system. Följande brandprovningssmetoder ingår i standarden:

- Skydd av maskinrum i rum som är maximalt 80 m³.
- Skydd av gasturbiner i inneslutningar som är maximalt 80 m³.
- Skydd av maskinrum i rum som är maximalt 260 m³.
- Skydd av gasturbiner i inneslutningar som är maximalt 260 m³.
- Skydd av maskinrum i rum som överstiger 260 m³.
- Skydd av gasturbiner i inneslutningar som överstiger 260 m³.
- Skydd av utrymmen med kategori HC-1 (”Hazard Category 1”, tidigare benämnd ”Light Hazard Occupancies”).
- Skydd av utrustning i renrum (”wet benches”) och liknande processutrustning.
- System för punktskydd.
- Skydd av industriella fritöser som används inom livsmedelsindustrin.
- Skydd av övergolv i datorhallar.
- Skydd av pressutrustning för tillverkning av träskivor.
- Dragskåp i kemiska laboratorier.
- Andra utrymmen som FM Global har ett intresse att skydda med vattendimma.

I nedanstående tabell finns en sammanställning av FM godkända system för HC-1 (”Hazard Category 1”) och hur de skall installeras och dimensioneras. Tabellen redovisar endast system där det inte finns någon begränsning på rumsvolym. Denna riskklass omfattar verksamheter med låg brandbelastning där en brand kan förväntas utvecklas långsamt. Exempel på sådana verksamheter är lägenheter, kyrkor, hotellrum, bibliotek (dock inte lagerutrymmen), kök, sjukhus, mötesrum i konferensanläggningar och hotell, museum, kontor, serveringsytor i restauranger och klassrum i skolor.

Tabell 2 Sammanställning av FM godkända system för HC-1 (”Hazard Category 1”) och hur de skall installeras och dimensioneras. Ingen begränsning på rumsvolymen finns men maximal takhöjd är 5 m.

Tillverkare	System	K-faktor [(l/min)/b ar ^{1/2}]	Minsta tryck [bar]	Beräknat flöde vid minsta tryck (l/min)	Maximalt avstånd mellan munstycken [m]	Beräknad maximal täckningsyta per munstycke [m ²]	Beräknad minsta vattentäthet [mm/min]
GW Sprinkler A/S	LOFLOW® K15 Model O	15	6	36.7	3.5	12.25	3.0
Marioff Corporation Oy	HI-FOG® 2000	4.1	80	36.7	5.0	25	1.5
Marioff Corporation Oy	HI-FOG® GPU	-	Varierar	Varierar	4.0	16	Varierar
Tyco Fire & Building Products	AquaMist AM29	8.5	7.6	23.4	3.7	13.7	1.7
VID Fire- Kill ApS	Model OH- OS	16.5	10	52.2	3.7	13.7	4.0

Systemens vattenkälla skall dimensioneras för antingen de hydrauliskt sämst belägna nio (9) munstyckena eller alla munstycken inom en verkningsyta om 140 m^2 . Det dimensioneringsalternativ som ger störst vattenflöde skall väljas. Vattenkällan skall ha en varaktighet om minst 60 minuter och brandposter för manuell brandsläckning skall dimensioneras för 950 liter/min.

Exempel på dimensionering:

HI-FOG® 2000: 140 m^2 verkningsyta dividerat med 25 m^2 per munstycke = 5.6 stycken munstycken. Det är därför sannolikt att dimensioneringen görs med nio munstycken. Ungefärligt flöde per munstycke är 36.7 liter/min. Multipliserat med nio munstycken ger det ett totalflöde om 330 liter/min.

AquaMist AM29: 140 m^2 verkningsyta dividerat med 13.7 m^2 per munstycke = 10.2 stycken munstycken. Det är därför sannolikt att dimensioneringen görs med 140 m^2 verkningsyta (motsvarande elva munstycken). Ungefärligt flöde per munstycke är 23.4 liter/min. Multipliserat med elva munstycken ger det ett totalflöde om 257 liter/min.

Som jämförelse kan sägas att ett traditionellt sprinklersystem för denna riskklass skall dimensioneras med en vattentäthet om 4 mm/min och en verkningsyta om 140 m^2 det vill säga ett dimensionerande flöde om cirka 560 liter/min. Utrymmet tillåts ha en takhöjd upp till och med 9 m. Även i detta fall skall vattenkällan ha en varaktighet om minst 60 minuter och brandposter för manuell brandsläckning skall dimensioneras för 950 liter/min. Här kan noteras att dimensioneringen är densamma oavsett om:

- Systemet är ett våtrör- eller torrörssystem.
- Sprinklerna är nedåt- eller uppåtriktade.
- Sprinklerna är ”standard” eller ”quick response”.
- Dessutom är en viss taklutning tillåten.

De godkända vattendimsystemen är begränsade till:

- Maximalt 5 m takhöjd.
- Våtrörssystem.
- Nedåtriktade munstycken.
- Fast response munstycken, ofta med 2 mm eller 1.5 mm, 57°C glasbulb.
- Släta horisontella tak.

En direkt jämförelse mellan dimensioneringen för ett traditionellt sprinklersystem och ett FM godkänt vattendimsystem är därför inte helt entydig.

4.3.2 FM 5580

FM 5580, ”Approval Standard for Hybrid (Water and Inert Gas) Fire Extinguishing Systems”, publicerades i sin första utgåva 2012 [34] och innehåller krav på system som kan definieras som en hybrid mellan ett rent vattendimsystem och ett gassläckningssystem. Med detta menas att gasen är en avgörande beståndsdel för att släcka en brand och inte bara ett medium för att atomisera vattnet till mindre vattendroppar. Gasen i ett hybridssystem kan bestå av helium, neon, argon, kvävgas, koldioxid eller blandningar av dessa gaser men vanligast är sannolikt kvävgas.

För att klassificera ett system krävs brandförsök som genomförs i ett försöksrum med volymen 260 m^3 . Rummet skall var försett med en normalstor dörröppning med dörr.

Brandförsök skall göras med antingen heptan eller dieselolja som bränsle, beroende på vilka brandrisker systemet skall tillämpas för. Ett försök ska göras med en 1 MW spraybrand med dörren till försöksrummet stängd och ett försök med en 2 MW spraybrand med dörren öppen. Det sistnämnda försöket ska även göras med enbart gas. Om systemet inte släcker branden i det sistnämnda försöket så är det inte ett "gassläckningssystem" utan systemet skall antingen klassificeras som ett hybridssystem eller ett rent vattendimssystem beroende på resultatet i de två förstnämnda försöken. Klassificeringen baseras på den uppmätta syrekoncentrationen i försöksrummet enligt följande resonemang:

- Systemet skall klassificeras som ett gassläckningssystem om syrekoncentrationen vid brandsläckning är lägre än 12.5 %. Dessutom skall branden vid brandförsöket med enbart gas släckas (se ovan).
- Systemet skall klassificeras som ett hybridssystem om syrekoncentrationen vid brandsläckning är mellan 12.5 % och 16%.
- Systemet skall klassificeras som ett rent vattendimssystem om syrekoncentrationen vid brandsläckning är högre än 16%. Dessutom skall branden vid brandförsöket med enbart gas (se ovan) inte släckas.

Gastemperaturen i försöksrummet kan användas som en sekundär parameter för att klassificera ett system eftersom systemens förmåga att kyla brandgaserna varierar.

Ett system som kombinerar vatten och inertgas och som klassificerats som ett gassläckningssystem skall utvärderas enligt FM 5600, "Approval Standard for Clean Agent Fire Extinguishing Systems" och FM Global Property Loss Prevention Data Sheet 4-9, "Clean Agent Fire Extinguishing Systems".

Ett system som klassificerats som ett rent vattendimssystem skall utvärderas enligt FM 5560, "Approval Standard for Water Mist Systems" och FM Global Property Loss Prevention Data Sheet 4-2, "Water Mist Systems".

Slutligen, ett system som klassificerats som ett hybridssystem skall utvärderas enligt de brandprovningssmetoder som finns FM 5580. För ett hybridssystem som räknas som det primära skyddet skall släckmedelsmängden (vatten och inertgas) dimensioneras motsvarande de krav som ställs på ett automatiskt sprinklersystem för brandrisken. Varaktigheten är därför minst 60 minuter. Om systemet inte räknas som det primära skyddet kan varaktigheten vara betydligt kortare, dock alltid minst 10 minuter.

4.4 CEN/TS 14972

År 1998 inledde en arbetsgrupp under CEN/TC191/WG5 ett arbete med att ta fram installationsanvisningar och brandprovningssmetoder för fasta system på "land" i en EN-standard. År 2008 publicerades den första utgåvan som CEN/TS 14972:2008. Dokumentet fick inte status som en EN-standard utan en något lägre status som en "Teknisk specifikation". De europeiska medlemsländerna skall offentliggöra förekomsten av en Teknisk specifikation och publicera den på nationell nivå i lämplig form. Däremot behöver man inte dra tillbaka eventuella nationella standarder inom samma teknikområde.

Sverige valde att publicera dokumentet som SS-CEN/TS 14972:2008 utan att översätta innehållet från engelska till svenska. År 2011 publicerades den andra utgåvan som SS-CEN/TS 14972:2011 [35]. Dokumentet innehåller detaljerade anvisningar för hur ett system skall utföras, installeras och underhållas samt hur en installation skall dokumenteras. Utöver detta finns sex stycken (A – F) annex med följande innehåll:

- Annex A: Brandprovningssmetoder för 1) brandfarliga varor, 2) kabeltunnlar, 3) kontor och 4) fritöser.
- Annex B: Rekommendationer för utformning av brandprovningssmetoder.
- Annex C: Rekommendationer för mätning av vattendroppstorlek.
- Annex D: Rekommendationer för komponentprovning av munstycken. Kommentar: Detta avsnitt är relativt översiktligt beskrivet och förefaller hämtat direkt från UL 2167.
- Annex E: Rekommendationer för funktionsprov vid driftsättning och underhåll.
- Annex F: Brandprovningssmetoder för vissa verksamheter inom Normal riskklass 3 (OH3).

Standarden definierar vattendimma som en vattenspray där 90% (inte 99 %) av det kumulativa volymsflödet utgörs av vattendroppar mindre än 1000 µm (1 mm), alltså snarlikt den definition som finns med den första utgåvan av NFPA 750.

4.5 VdS

VdS Schadenverhütung i Tyskland är ett oberoende, internationellt institut som provar och certifierar utrustning för brandsäkerhet och säkerhet. Alla krav och standarder tas fram i samarbete med försäkringsbranschen och internationella organisationer. Man har publicerat flera brandprovningssmetoder för vattendimma:

- Parkeringsgarage.
- Undertak- och övergolvsutrymmen där den primära brandbelastningen är elkablar.
- Kontor.
- Hotell.
- Kabeltunnlar.

Resultat från flera av dessa brandprovningssmetoder diskuteras i denna rapport, därför beskrivs inte metoderna i detalj.

5 Tillämpad forskning och utveckling för specifika applikationer

I detta kapitel redovisas ett antal, i flera fall mycket ambitiösa, tillämpade studier av användning av vattendimma. De fall som redovisas visar hur valet av system styrs av den aktuella applikationen, skyddsmålen samt de förutsättningar som råder bland annat vad gäller tillgängligt vattentryck, tillgång på vatten, kostnadskrav, etc.

5.1 Beräkning av tillförlitlighet för olika systemlösningar

5.1.1 Felträdsanalys av tillförlitligheten för åtta olika systemlösningar

FM Global har gjort en detaljerad felträdsanalys av tillförlitligheten för åtta olika systemlösningar [36]. De åtta olika systemlösningarna är identifierade i NFPA 750 (utgåva 2003) och kan sammanfattas enligt nedan:

- System A: Högtryckssystem med drivgasbehållare och vatten lagrat i tryckkärl.
- System B: Högtryckssystem med flera drivgasbehållare och vatten lagrat i tryckkärl.
- System C: Lågtryckssystem med pneumatisk sönderdelning av vatten.
- System D: Lågtryckssystem med drivgasbehållare och vatten lagrat i tryckkärl.
- System E: System med pump anslutet till extern vattenkälla.
- System F: Deplacementpump med tryckavlastningsventiler på varje pump och tryckavlastningsventiler på samlingsröret.
- System G: Gasdriven pump för maskinrum och inneslutningar för gasturbiner.
- System H: Gasdriven pump för användning i låg riskklass.

Vid analysen identifierades alla tänkbara större felfunktioner. För att underlätta analysen gjordes följande antaganden:

1. Att alla systemkomponenter var korrekt utformade och tillverkade. Till exempel att rör klarar förväntade tryck och mekanisk påverkan och att tillverkningsfel inte är en orsak till fel.
2. Att samtliga system varit i drift och/eller driftprovats tillräckligt lång tid för att inte drabbas av inkörningsproblem men heller inte varit i drift så lång tid att det påverkas av rent slitage.
3. Ingen positiv ingripande antas påverka funktionen, till exempel att någon manuellt öppnar en ventil som inte fungerar som avsett.

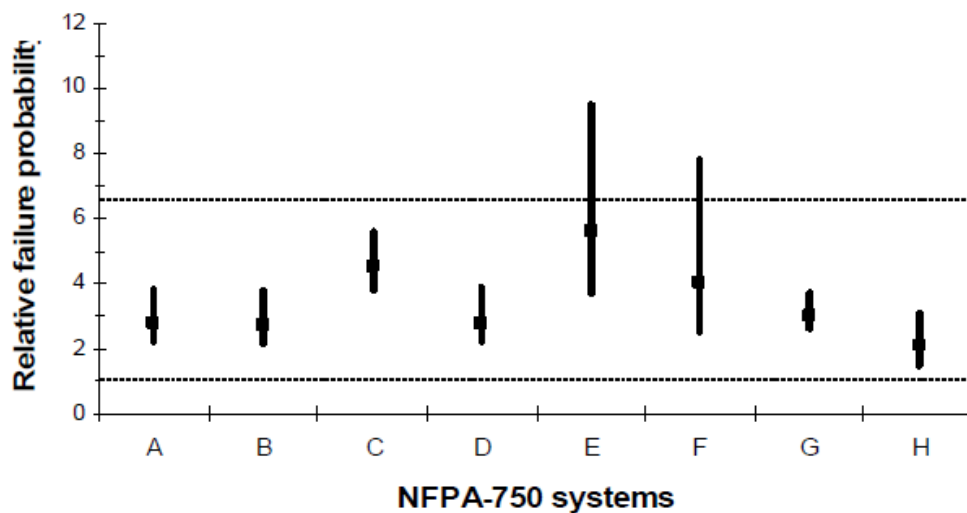
De flesta systemfel kan kategoriseras som antingen, driftsfel, fel på passiva komponenter och fel vid behov. De tre olika kategorierna kan beskrivas enligt nedan:

- Driftsfel är kopplade till komponenter som ständigt är i drift, till exempel ventiler.
- Fel på passiva komponenter är relevanta för komponenter som är passiva eller som står i vänteläge tills de behövs, till exempel en flödesvakt. Dessa komponenter karakteriseras av att sannolikheten för fel varierar med tidsintervallet mellan kontroll eller provning.
- Fel vid behov. Fel på komponenter som förväntas fungera vid behov karakteriseras av att de är tidsberoende.

Den kvantitativa analysen kräver tillförlitlighetsdata för de systemens enskilda komponenter. Data specifika för vattendimma saknas dock och därför användas data för samma typ av komponent från andra tillämpningar.

Efter att sannolikheten för fel beräknats för de enskilda komponenterna beräknades sannolikheten för fel för hela systemet med en felträdsanalys. Vid analysen ansattes att systemet inte fungerar vid brand om vattenflödet är för lågt, fördröjt eller helt uteblir när behov uppstår. Vid beräkningen antogs att systemen kontrolleras en gång per år. Resultaten skall betraktas som preliminära eftersom sannolikheten för fel på de enskilda komponenterna hämtats från andra tillämpningar. Resultaten presenteras därför som en relativ sannolikhet för fel jämfört med sannolikheten för fel för traditionella, automatiska sprinklersystem. Den tidigare studien för sprinklersystemen har dock ej publicerats.

Figur 20 visar kvoten mellan sannolikheten jämfört med ett traditionella, automatiskt sprinklersystem. Resultaten anges som ett medelvärde med ett 90% konfidensintervall.



Figur 20 Relativ sannolikhet för systemfel för åtta olika systemlösningar specificerade i NFPA 750 (utgåva 2003) jämfört med ett automatiskt sprinklersystem [36].

Som framgår av figuren varierar sannolikheten för systemfel med systemlösning. System E och F har högre sannolikhet för systemfel jämfört med de andra systemlösningarna.

Analysen visar att inverkan av enskilda komponentfel varierar med systemlösningen. Fel med stor inverkan på sannolikheten för ett systemfel är normalt att vattenkällan saknar vatten, för lågt tryck i drivgasbehållare, felaktiga styreinställningar, fel i brandlarmcentral eller överföringsfel, stängd huvudventil och fel i brandlarmcentral. Mänskliga fel, som att drivgas eller vattenbehållare är tomma eller att styreinställningar är fel är vanliga. Fel i brandlarmcentralen eller överföringsfel som ledningsbrott eller anslutningsfel (förutsatt sådana används) är generellt bland de fem största bidragen till systemfel.

5.1.2 Felträdsanalys av tillförlitligheten för system på fartyg

Inom ramen för det så kallade FIRE PROOF projektet har tillförlitligheten för branddetektionssystem samt sprinklersystem, vattendimma, koldioxid och skumsystem på fartyg genomförts [37]. Baserat på en (konstant) sannolikhet för fel i systemens ingående komponenter togs en exponentiell kurva fram som beskriver tillförlitligheten för ett helt

system som funktion av tiden. På detta sätt kan tillförlitligheten givet ett visst tidsintervall mellan kontroll och underhållsåtgärder beräknas. Tillförlitligheten för enskilda komponenter hämtades i första hand från databaser som bygger på verkliga erfarenheter. I de fall sådana data inte fanns tillgängliga gjordes felträdsanalyser.

I passagerarutrymmen på fartyg installeras automatiska sprinklersystem, det vill säga sprinkler som aktiveras automatiskt av värmen från en brand. Systemet delas in i sektioner där varje sektion tillåts ha maximalt 200 sprinkler. Sektionerna har flödesvakter som ger både ett visuellt och audiellt larm i fartygets kontrollrum när en eller flera sprinkler har aktiverat. Varje sektion har en sektionsventil som är placerad utanför den aktuella sektionen, normalt i ett låst skåp i trapphuset. Sektionsventilerna är övervakade. Vattenkällan består av en trycktank, en luftkompressor och en sprinklerpump. Tidsintervallet mellan kontroll och underhållsåtgärder varierar beroende på typ av system och mellan olika rederier. Intervallen är reglerade i dokumentet IMO MSC./Circ. 850.

System av typen vattendimma är numera betydligt vanligare än traditionella sprinklersystem i passagerarutrymmen på fartyg. I projektet analyserades två olika typer av system, dels ett mer generiskt system, dels den systemlösning som används av Carnival Cruise Lines. I nedanstående tabell redovisas den beräknade tillförlitligheten för dessa tre system givet att systemen kontrolleras och underhålls en gång varje månad respektive en gång per år. Resultaten redovisas med standardavvikelsen.

Tabell 3 Beräknad tillförlitlighet för ett traditionellt sprinklersystem och två olika systemlösningar för system av typen vattendimma.

Typ av system	Tillförlitlighet vid olika underhållsfrekvens	
	Månatligt underhåll	Årligt underhåll
Traditionell sprinkler	99.5% ± 0.3%	93.7% ± 3.6%
Vattendimma (generiskt)	96.8% ± 1.8%	69% ± 16%
Vattendimma (förbättrad)	98.6% ± 0.8%	84.7% ± 8.3%

Analysen visar ett traditionellt automatiskt sprinklersystem har en hög tillförlitlighet. Tillförlitligheten är i samma storleksordning men något lägre för system av typen vattendimma. Styrkan med en felträdsanalys är, enligt rapporten, att den i princip kan användas för vilket system som helst oavsett dess komplexitet. Svagheten är att den inte beaktar samspelet mellan komponenter och dominoeffekter. Tillförlitligheten för olika komponenter i ett system är inte nödvändigtvis oberoende, ett fel i en komponent kan fortplanta sig till nästa komponent. Av det skälet är en felträdsanalys endast en approximation av ett systems verkliga tillförlitlighet. Inte desto mindre kan metodiken ge användbara resultat när inget annat källmaterial finns till hands. Det rekommenderas att resultaten jämförs med resultat från försök eller historiska data för att verifiera beräkningsmodellen.

5.2 Maskinrum i ubåtar

DCNS Ingénierie i Frankrike har genomfört försök i en mock-up som simulerar en del av en ubåt i full skala. Invändigt fanns två plan och en inredning som återspeglade relevanta obstruktioner. Nettovolymen var cirka 70% av bruttovolymen. Fribrinnande försök visade att rumsvolymen snabbt fylls av toxiska brandgaser som begränsar siktbarheten och ger ett övertryck i utrymmet. Målsättningen var därför att utveckla ett detektionssystem som på ett snabbt och tillförlitligt sätt detekterar och bestämmer positionen av en brand och att ta fram ett släcksystem som effektivt släcker branden eller dämpar brandeffekten.

Ett vattendimmsystem provat och certifierat enligt IMOs brandprovningssytemetoder ansågs inte användbart eftersom ett ubåtsmaskinrum är betydligt mer obstruerade än

fartygsmaksinrum, kravet på 15 minuters släckning ansågs inte tillräckligt bra och det ansågs omöjligt att tillämpa de installationsrekommendationer som genereras av IMOs brandprovningssystem. Man utvecklade därför ett eget koncept som bygger på munstycken som ger omkring 5 liter/min vid 15 bars systemtryck. Munstyckena placeras strategiskt i maskinrummet med ett horisontellt avstånd mellan 1.5 m till 2.5 m. Detta motsvarar en vattentäthet omkring 1 – 3 mm/min. Nedanstående tabell redovisar en jämförelse mellan högtryckssystem provat och certifierat enligt IMOs brandprovningssystem och det egenutvecklade franska systemet [38].

Tabell 4 Jämförelse mellan högtryckssystem provat och certifierat enligt IMOs brandprovningssystem och det egenutvecklade franska systemet för maskinrum i ubåtar [38].

Water mist system	Certified system	Qualification for environment submarine
Global flow rate	Around 0.3 liter/min/m ³	Around 0.5 liter/min/m ³
Particular flow rate by nozzle	10 to 15 liter/min	Around 5 liter/min
Spacing between nozzles	3 meters to 4 meters	1.5 meters to 2.5 meters
Time to extinction	<15 minutes	<1 minute

Ett försök i mock-upen visade att ett högtryckssystem certifierat enligt IMOs krav krävde cirka 10 minuters släckningstid vilket var jämförbart med tiden för självsläckning på grund av syrebrist i de fribrinnande försöken. Reduktionen av gastemperaturen under denna tid var marginell. Motsvarande försök med det egenutvecklade och utrymmes Anpassade lågtryckssystemet gav bättre prestanda; 1 – 2 minuter till släckning och snabba temperatursänkningar samt 0.5 – 1 minuter till acceptabla temperaturnivåer. Vid försök med obstruerade bränder (t.ex. brand under ett ”bord”) tog släckningen längre tid (upp till fem minuter) men temperatursänkningen runt branden var fortfarande mycket snabb [39].

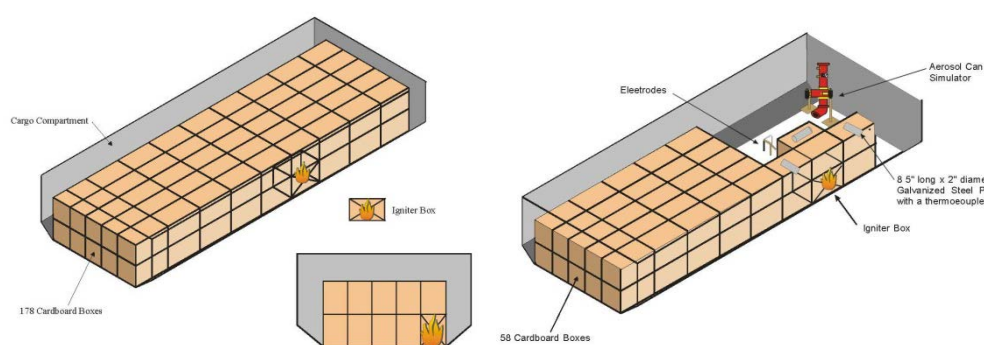
5.3 Lastutrymmen på flygplan

I början av 1990-talet undersökte Federal Aviation Administration (FAA) huruvida ett vattenspraysystem som aktiveras i kabinen på ett flygplan ger passagerarna ett skydd vid en bränslebrand efter en flygplanskrasch. Resultaten visade att ett optimerat system kunde ge en betydelsefull ökning i överlevnadstid.

Baserat på de goda erfarenheterna har man även studerat vattenspray- och vattendimmsystem i lastutrymmen som ett alternativ till Halon 1301. Preliminära resultat indikerar att vattendimma effektivt dämpar bränder i brandfarlig vätska och bränder i fibröst material men mer arbete krävdes för att reducera det totala vattenbehovet, optimera styrlogik och förbättra systemet för att klara brandförlopp med exploderande sprayflaskor (aerosoler).

I en serie ytterligare försök [40] undersökte man en kombination av vattendimma och kvävgas och hur långt det går att optimera ett sådant system. Normalt finns kvävgasgenerator ombord på flygplan för att inertera bränsletankar. Vid försöken simulerade man denna generator med kvävgas i gasflaskor. Systemen hade separata rör och munstycken och syftet var att inertera lastutrymmet med kvävgas efter att branden dämpats ned av vattendimman. Försöken genomfördes i ett lastrum på ett ”wide-body” flygplan med volymen 57 m³. De ursprungliga invändiga ytskikten ersattes med tunn (cirka 1.5 mm) stålplåt. Hela utrymmet instrumenterades för att mäta gastemperaturer, syrekonscentrationen och trycket. Utrymmet ventilerades med ett mekanisk ventilation motsvarande 1.4 m³ per minut. Fyra olika brandscenarier användes, brand i bulklast, brand i en lastcontainer, spillbrand och en exploderande sprayburk (aerosol).

Branden i bulklasten simulerades med 178 stycken kubiska wellpappkartonger (457 mm × 457 mm × 457 mm) fyllda med löst packat, strimlat kontorspapper så att totalvikten var omkring 2 kg per kartong. Kartongerna staplades två på höjden och placerades dikt an mot varandra så att det inte fanns någon egentlig luftspalt mellan kartongerna. I kartongen där branden anlades borrades tio stycken 25 mm cirkulära hål för att säkerställa att branden inte självslocknade. Samma typ av kartonger, fyllnadsmaterial och antändningskälla användes för att simulera brand i en lastcontainer. Totalt 33 stycken kartonger staplades tätt mot varandra i en lastcontainer. Containerns tak och insida var konstruerad av aluminium, fronten av Lexan (polykarbonat) och resten av stålplåt. Två ventilationsöppningar om 305 mm × 76 mm gjordes på två av sidorna. Brandens antändningskälla placerades i en av kartonger i det undre lagret vid ett av lastcontainerns hörn. Två tomma lastcontainrar placerades dikt an den fyllda containern.



Brand i bulklast

Brand i aerosolburk

Figur 21 Två av de brandscenarier som användes vid försöken i ett simulerat lastutrymme på ett flygplan, brand i bulklast och brand i en aerosolburk [40].

Spillbrandsценariet utgjordes av 1.9 liter Jet A bränsle i en kvadratisk balja med måtten 610 mm × 610 mm med 100 mm kanthöjd. Baljan placerades 305 mm under lastutrymmets tak och på ett så långt horisontellt avstånd från något vattendimmunstycke som möjligt.

Explosionen i tre stycken sprayburkar simulerades med hjälp av tre galvaniserade järnrör. Varje rör var 210 mm långt, hade en innerdiameter om 38 mm och var slutet så att det fungerade som ett tryckkärl för en blandning av brännbar gas och drivgas. Blandningen bestod av 20% propan i vätskefas, 60% etanol och 20% vatten. Denna blandning var baserad på vad som huvudsakligen återfinns i en "16-ounce" sprayburk med hårspray. På röret fanns en snabböppnande kulventil som öppnades med en pneumatisk don. På röret installerades dessutom ett termoelement. Blandningen distribuerades horisontellt som ett gasmoln. I detta scenario fylldes lastrummet med 58 stycken wellpappkartonger. Branden startades i en kartong placerad på golvnivå i en ytterrad och vattendimmsystemet aktiverades en minut efter att ett termoelement i taket nått 93°C (200°F). Ventilen i de simulerade sprayburkarna öppnades 2.5 minut efter att något av termoelementen på rören nått 204°C (400°F).

Släcksystemet bestod av högtryckspump anslutet till ett rörsystem med fyra 3/8" grenrör i rostfritt stål med vardera åtta stycken munstycken, alltså totalt 32 munstycken. Det horisontella avståndet mellan varje grenrör var 740 mm och avståndet mellan munstyckena var 395 mm. Munstyckena var nedåtriktade och installerade 25 mm nedanför taket. De gav vattendroppar med storlek mellan cirka 70 µm och 100 µm.

Kvävgasen till utrymmet distribuerades med ett separat rörsystem med munstycken som var kopplat till en gascylinder. Trycket från gascylindrarna reglerades med en reglerventil till 34.5 bar och ett initialt gasflöde om 2.5 m³/min.

Resultaten från försöken kan sammanfattas enligt nedan:

- Både systemet med enbart vattendimma och systemet som kombinerade vattendimma och kvävgas klarade att släcka bränderna med öppen flamma och att dämpa glödbänderna.
- Systemet med enbart vattendimma misslyckades att släcka aerosolbranden, i första hand för att reduktionen av syrekonzentrationen (ned till cirka 15%) som åstadkoms av branden själv och vattenånga inte var tillräcklig låg för att förhindra en explosion.
- Systemet som kombinerade vattendimma och kvävgas klarade aerosolscenariet.
- Reduktionen av syrekonzentrationen (10%) vid försöken med systemet som kombinerade vattendimma och kvävgas förhindrade en explosion i de brännbara gaser som generades i aerosolscenariet.
- Kombinationen vattendimma och kvävgas reducerade förbrukningen av vatten med mer än 50% jämfört med enbart vattendimma.

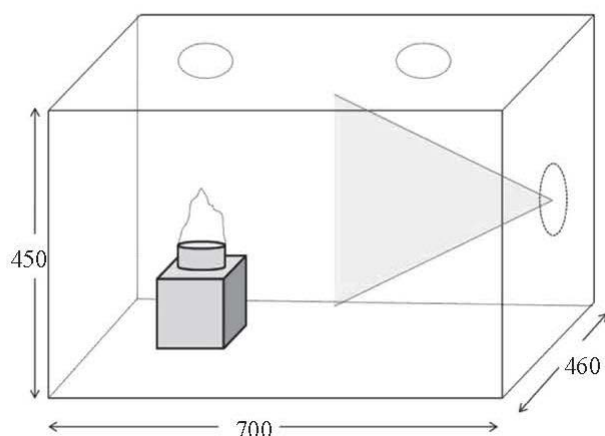
5.4 Utvärdering av additiver

5.4.1 Studie vid University of Ulster

Referens [41] redovisar en studie av inverkan på släckeffektivitet av olika additiver. Samtliga additiver valdes med hänsyn till känd eller beräknad effektivitet, låg toxicitet och låg miljöpåverkan och faller inom olika grupper:

- Alkalimetallsalter: NaCl, KCl och KHCO₃.
- Övergångsmetallklorider: ZnCl₂, MnCl₂, CuCl₂.
- En fosfat: (NH₄)₂HPO₄.
- En diamid: (NH₂)₂CO.
- En järnförening: FeSO₄·7H₂O.

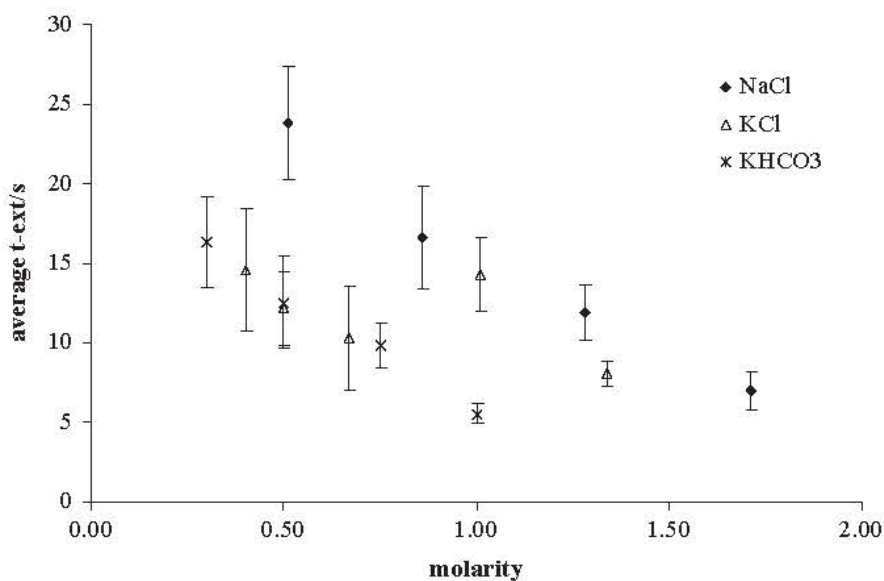
Förförsök gjordes i en modifierad så kallad ”cup-burner” utrustning där effektiviteten baserades på tiden till släckning jämfört med vattendimma av rent vatten. Eftersom genomflödet av luft och släckmedel förhindrar att den relativa mängden vattendroppar ökar i luften och vatten träffade rörets innerväggarna genomfördes den huvudsakliga försöksserien i ett mindre utrymme som var 700 mm × 450 mm × 460 mm. Detta utrymme medgav att den relativa mängden vattendroppar ökar i luften och reducerar inverkan av vatten som träffade innerväggarna. En cirkulär balja med diametern 50 mm fylldes med heptan och användes som brandkälla. Ett munstycke riktades horisontellt mot baljan från en av sidoväggarna. En smal skiva placerades 100 mm framför munstycket för att förhindra att vattendroppar direkt träffade branden. Munstyckstrycket var 2 bar och flödet 0.42 g/s och 0.49 g/s (25 g/min – 29 g/min). Den genomsnittliga vattendroppstorleken uppskattades till 27 µm. För att förhindra att branden sloknade av syrebrist hade utrymmet ett kontinuerligt genomflöde av luft och två stycken öppningar i taket. Utan påföring av vattendimma brann brandkällan tills bränslet var förbrukat, vilket tog minst 20 minuter. En principskiss av försöksuppställningen visas i figur 22.



Figur 22 Försöksupställning (princip) för försök med olika additiver i ett mindre utrymme [41].

Tiden till släckning mättes vid olika koncentrationer av additiv. Vid varje försök hade brandkällan en förbrinntid om 180 sekunder (3 minuter) innan påföringen av vattendimma. Tiden till släckning mättes från denna tidpunkt och medelvärdet beräknades baserat på flera försök.

För vattendimma av rent vatten var släckningstiden 154.6 sekunder med en standardavvikelse om 17.31 sekunder. Resultaten för alkalialterna redovisas i figur 23 där koncentration anges i mol. Samtliga alkalialter reducerade släckningstiden jämfört med rent vatten och det finns ett linjärt samband mellan koncentrationen och släckningstiden. Tydligast linjärt samband finns för KHCO_3 . Denna additiv var också den mest effektiva och den genomsnittliga släckningstiden reducerades till 5.5 sekunder, alltså en reduktion med mer än 96% med 10 vikt-% inblandning.



Figur 23 Genomsnittlig tid till släckning med ökande koncentration med alkalialterna NaCl, KHCO_3 och KCl vid försöken i ett mindre utrymme [41].

Övriga additiver provades endast vid en 3% lösning. Släckningstiderna var dock betydligt längre än för alkalisalterna. För $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ och $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ var till och med släckningstiderna längre än för rent vatten.

5.4.2 Studie vid Shanghai Maritime University

Referens [42] redovisar en annan studie av inverkan på släckeffektivitet av olika additiver. Försöken gjordes i en så kallad "cup-burner" med metangas som bränsle. Utrustningen består av en yttre glascylinder med en inre glaskopp som antingen fylls med vätskeformigt bränsle eller inrymmer en gasbrännare för gasformigt bränsle. En blandning av släckmedel och syre tillförs i botten av glascylindern, strömmar genom en bädd av glaskulor och ett filter och passerar flamman. Mängden släckmedel ökas till flamman slocknar. Släckkoncentrationen beräknas normalt som medelvärde från mellan fem till tio försök [43]. En principskiss av utrustningen visas i figur 24.

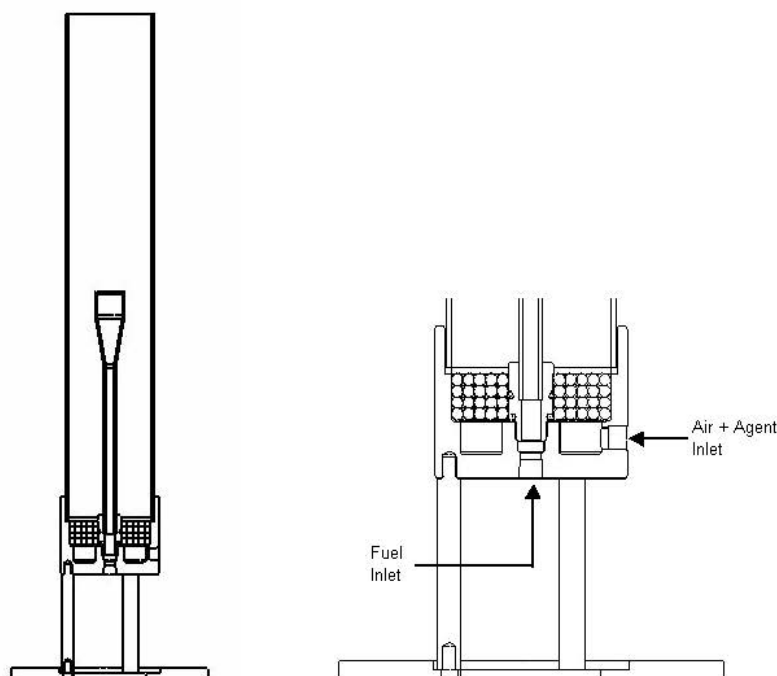


Figure A1. Cup-burner assembly.

Figure A2. Base assembly, enlarged.

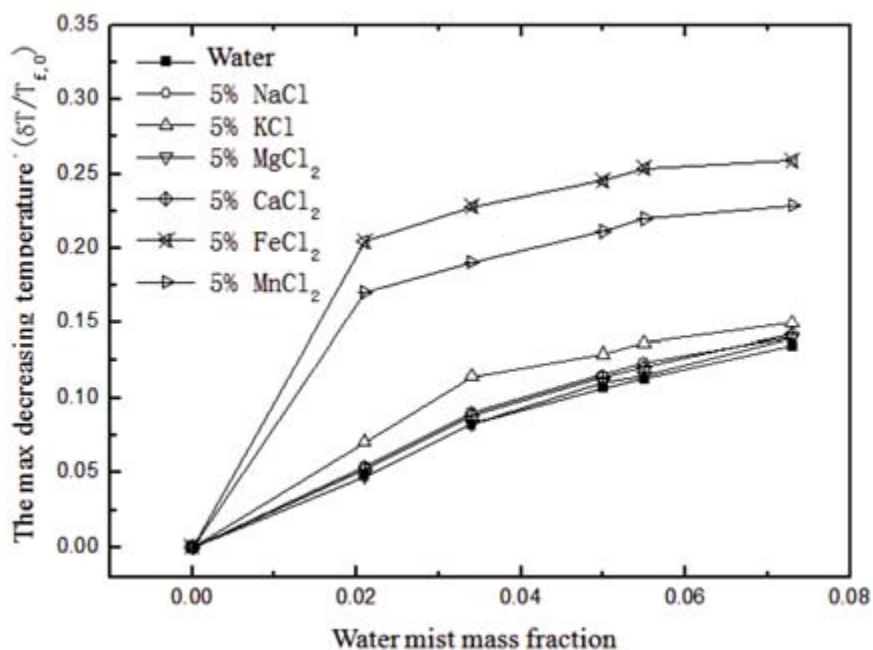
Figur 24 Principskiss av en så kallad "cup-burner" där släckkoncentrationen för gasformiga släckmedel kan bestämmas [44].

I detta fall användes vattendimma med en dropstorlek omkring $10\ \mu\text{m}$ som släckmedel. Exakt hur vattendropparna genererades och hur de tillfördes glascylindern är inte redovisat. Temperaturen i flamman mättes med ett mycket tunt termoelement som flyttades runt i olika positioner och reduktionen av gastemperaturen användes som ett mått på additivernas effektivitet.

Sex olika metallklorider lösta till olika koncentration i destillerat vatten provades, magnesiumklorid (MgCl_2), kalciumklorid (CaCl_2), natriumklorid (NaCl), kaliumklorid (KCl), manganklorid (MnCl_2) och järnklorid (FeCl_2).

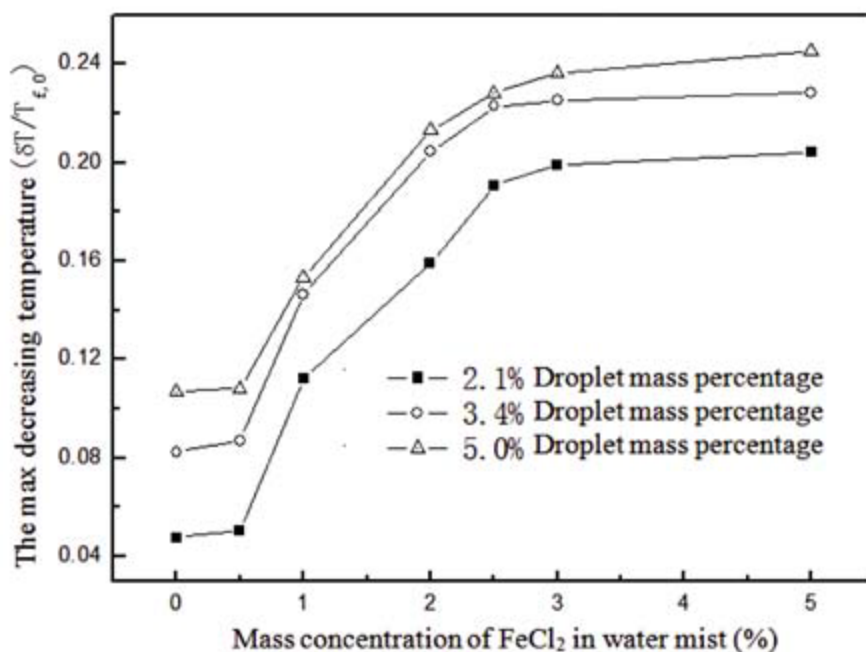
Baserat på temperatursänkningen var effektiviteten enligt följande; sämst var de alkaliska jordartsmetallkloriderna (Mg , Ca), följt av alkalimetallkloriderna (Na , K) och bäst var kloriderna med övergångsmetaller (Fe , Mn). Vid samma koncentration var

temperatursänkningen för kloriderna med övergångsmetaller en faktor två bättre än alkalimetallkloriderna. Effektiviteten ökade med ökad koncentration men det finns en övre gräns för hur hög koncentrationen kan vara beroende på additivens ångtryck. Figur 25 visar den relativa minskningen (jämfört med vattendimma utan additiv) av den uppmätta maxtemperaturen som funktion av massfraktionen vattendimma vid en given koncentration additiver. I detta fall var masskoncentrationen 5%. Här framgår tydligt att framförallt lösningarna av vatten och MnCl_2 och FeCl_2 reducerar flamtemperaturen jämfört med rent vatten.



Figur 25 Den relativa minskningen av den uppmätta minskningen (jämfört med vattendimma utan additiv) som funktion av massfraktionen vattendimma vid en given koncentration additiver, i detta fall 5% [42].

Figur 26 visar hur den relativa minskningen av den uppmätta maxtemperaturen (jämfört med vattendimma utan additiv) varierar som funktion av koncentrationen av FeCl_2 vid olika massfraktion vattendimma. Här ses att effektiviteten ökar med ökad koncentration FeCl_2 men att det förefaller finnas en övre gräns där effektiviteten inte ökar mer.



Figur 26 Den relativa minskningen av den uppmätta maxtemperaturen (jämfört med vattendimma utan additiv) som funktion av koncentrationen av FeCl₂ vid olika massfraktion vattendimma [42].

För en icke förblandad flamma med metangas som bränsle är kylningen av flammen den primära mekanismen för att dämpa branden utan tillsats av additiver. Inblandningen av metallklorider har två positiva effekter som ökar effektiviteten. Små partiklar av metallklorider frigörs när vattendropparna förångas och partiklarna absorberar energi från flammen. Hur stor denna effekt är beror på densiteten, värmekapaciteten och förångningsvärmets hos partiklarna. Flammans utbredning är ett resultat av snabba reaktioner mellan väte, syre och förångat bränsle. Metallkloriderna genererar dessutom aktiva radikaler som hämmar reaktionen och flammans utbredning. Men metallkloriderna kan även ha en negativ inverkan på vattendimmans effektivitet så tillvida att de ökar ytspänningen och försvårar förångningen av vattendropparna genom att öka kokpunkten. Den här effekten beror på flamtemperaturen och molfraktionen metallklorider som är lösta i en lösning. De tre olika mekanismerna samverkar eller motverkar varandra vid interaktionen mellan vattendimma och metangasflammen i "cup-burner" utrustningen.

5.5 Utvärdering av frysskyddsmedel för våtrörsystem

Våtrörsystem som installeras utomhus, i isolerade och ouppvärmade utrymmen eller i kyl- eller frysrum kräver ett lämpligt frysskyddsmedel. Under senare år har frysskyddsmedel för traditionella sprinklersystem studerats, framförallt beroende på flera incidenter där sprinklersystem aktiverats och där blandningen av vatten och frysskyddsmedel antänts och bidragit till både personskador och dödfall [45, 46].

För vattendimmsystem, som genererar betydligt mindre vattendroppar än traditionella sprinklersystem, har Worcester Polytechnic Institute genomfört en studie [47] där man studerat lämpliga frysskyddsmedel ur tre olika aspekter; hur de påverkar spridningsbilden från ett munstycke, den potentiella risken för att ett system inte fungerar på grund av frysskyddsmedlet och påverkan på ett brandförlopp.

Man studerade fyra olika frysskyddsmedel; propylenglykol, glycerin, trimetylglycin (betain) och kaliumacetat. De båda förstnämnda är vanliga i traditionella sprinklersystem. Betain och kaliumacetat används som köldbärare i till exempel värmepumpar eller kylsystem. De koncentrationer som studien fokuserade på motsvarar en fryspunktssänkning till -20°C respektive -40°C. Valet gjordes för att spegla den lägsta temperatur som är representativ för de kallaste regionerna i USA (-40°C) och en koncentration motsvarande temperaturen mellan -40°C och 0°C, se nedanstående tabell.

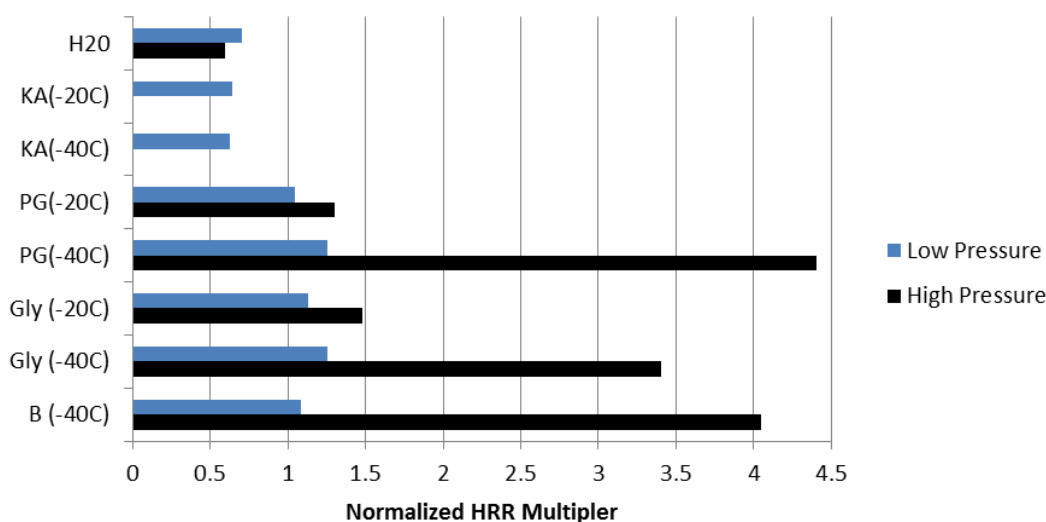
Tabell 5 De frysskyddsmedel och koncentrationer som studerades av Worcester Polytechnic Institute [47].

Frysskyddsmedel	Koncentration motsvarande -20°C fryspunktsänkning (vikt-%)	Koncentration motsvarande -40°C fryspunktsänkning (vikt-%)
Propylenglykol	40%	55%
Glycerin	48%	63%
Betain	41%	53%
Kaliumacetat	28%	39%

Vid brandförsöken användes två olika typer av munstycken, ett "högtrycksmunstycke" med flera munstycksöppningar och ett "lågtrycksmunstycke" med en munstycksöppning. Munstycket installerades vid taket i ett mindre rum. Vattenflödet för lågtrycksmunstycket var cirka 1.5 liter/minut vid 4.7 bar och för högtrycksmunstycket cirka 12.5 liter/minut vid 48.7 bar. Som brandkälla användes en 200 kW propangasbrännare som placerades i rummets mittpunkt.

Rörsystemet till munstycket i rummet fylldes med en lösning som motsvarade 10 sekunders påföring, därefter påfördes vatten under ytterligare 50 sekunder. Total påföringstid var alltså 60 sekunder. Referensförsök med rent vatten genomfördes också. Figur 27 visar den relativa förändringen av brandeffekten (HRR) för rent vatten samt de olika lösningarna med frysskyddsmedel. För betain genomfördes endast försök med en koncentration motsvarande en fryspunktssänkning om -40°C.

Non-dimensional HRR Summary



Figur 27 Den relativa förändringen av brandeffekten (HRR) för de olika lösningarna med frysskyddsmedel. Värderna över "1" motsvarar en ökning av brandeffekten, värdena under "1" en reduktion av brandeffekten [47].

Resultaten visar att samtliga frysskyddsmedel utom kaliumacetat ("KA" i figuren) tillförde energi till branden. I försöken med högtrycksmunstycket släcktes till och med branden när kaliumacetat användes.

För de försök där brandeffekten ökade är det noterbart att högtrycksmunstycket tillförde mer energi till branden jämfört med lågtrycksmunstycket, oavsett lösningens koncentration. För den högre koncentrationen motsvarande en fryspunktssänkning om -40°C var den tillförda energin avsevärt högre. Vid försöken observerades även att glycerin avsevärt ökade mängden rök.

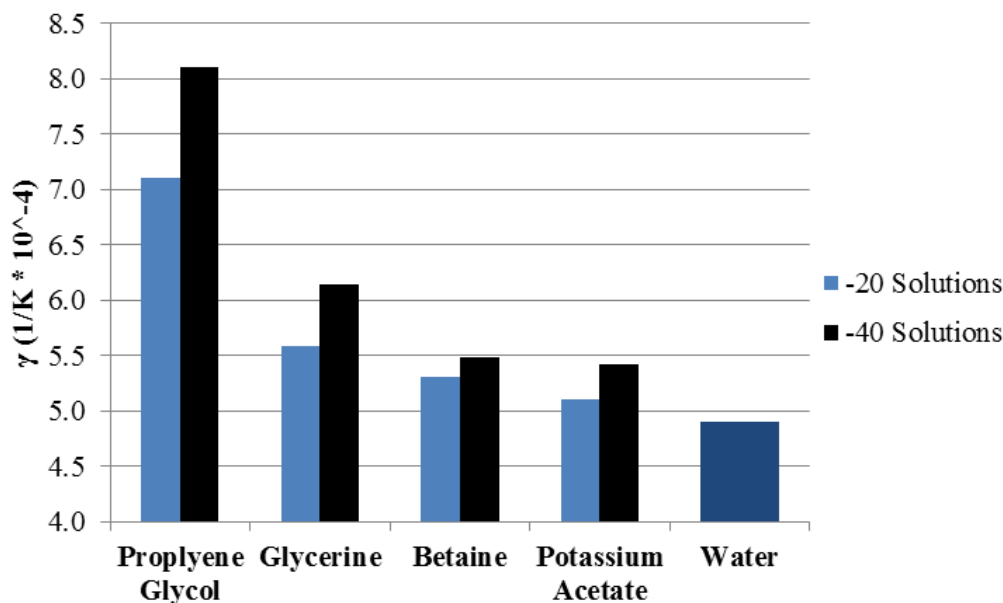
Förändringen av egenskaperna hos sprayen från munstyckena, såsom spridningsvinkel och droppstorlek provades inte men en studie av inverkan av viskositet, ytspänning och densitet gjordes. Dessa tre fysikaliska egenskaper har en delvis motstridig inverkan jämfört med rent vatten, särskilt avseende droppstorleken, som kan sammanfattas enligt nedan:

- Högre viskositet ger större droppar.
- Högre densitet ger mindre droppar.
- Lägre ytspänning ger mindre droppar.
- Högre tryck ger mindre droppar i samtliga ovanstående fall.

Vid brandförsöken observerades visuellt ingen förändring av spridningsbild och vattendroppstorlek men här bör noteras att lösningarna höll rumstemperatur och viskositeten ökar exponentiellt med lägre temperatur.

Studien omfattade även en analys av den potentiella risken för att ett system inte fungerar på grund av frysskyddsmedlet. De två primära orsakerna till detta är korrosion och volymexpansion vid ökande temperatur. Det senare bidrar till en tryckökning i systemet som skulle kunna ge läckage eller rörbrott, särskilt om rör och komponenter försvagats av korrosion. Här bör dock påpekas att system normalt bör ha någon form av expansionskärl och att korrosionsinhibitorer bör användas.

Vid studien av lösningarnas korrosionsegenskaper användes både rostfritt stål och koppar. Sämst korrosionsegenskaper har kaliumacetat och betain, som båda är betydligt mer korrosiva än propylenglykol och glycerin. Denna slutsats gäller dock bara koppar. För rostfritt stål var påverkan av de olika lösningarna så marginell att några direkta slutsatser om den relativa korrosionspåverkan inte gick att dra. Figur 28 visar en beräknad volymexpansionskoefficient. Resultaten visar att samtliga frysskyddsmedel expanderar mer än rent vatten och att ökad koncentration ökar expansionen. Störst expansion har propylenglykol, minst expansion kaliumacetat.



Figur 28 Beräknad volymexpansionskoefficient för de olika lösningarna [47].

Sammantaget visar studien att de studerade frysskyddsmedlen har fördelar såväl som nackdelar och begränsningar. I vissa fall är begränsningarna sådana att ett visst frysskyddsmedel vid en viss koncentration inte är användbar för vattendimsystem. I andra fall dikterar den specifika tillämpningen och utformningen av systemet om frysskyddsmedlet är användbart eller ej. Det finns ingen särskild trend mellan olika fysikaliska egenskaper, vilket gör förutsägelser utan särskild provning svår. Samtliga frysskyddsmedel i studien ökar densiteten, viskositeten, den volymetriska expansionen och korrosiviteten samt reducerar ytspänningen jämfört med rent vatten. Propylenglykol, glycerin och betain tillför energi till en brand och ökar därmed brandeffekten medan kaliumacetat förbättrar släckeffektiviteten jämfört med rent vatten. Tabell 6 visar samtliga resultat och rankar de fysikaliska egenskaperna för varje frysskyddsmedel från det högsta till det lägsta värdet.

Tabell 6 Rankning av de fysikaliska egenskaperna för varje frysskyddsmedel.

	Ytspänning	Viskositet	Densitet	Volymexpansion	Korrosivitet	Energibidrag
Hög	Vatten	Glycerin	Kaliumacetat	Propylenglykol	Betain	Propylenglykol
	Betain	Propylen-glykol	Betain	Glycerin	Kaliumacetat	Betain
	Glycerin	Betain	Glycerin	Betain	Propylenglykol	Glycerin
	Kaliumacetat	Kalium-acetat	Propylen-Glykol	Kaliumacetat	Glycerin	Vatten
Låg	Propylenglykol	Vatten	Vatten	Vatten	Vatten	Kaliumacetat

Det ideala frysskyddsmedlet har en hög ytspänning i kombination med låg viskositet, densitet, volymexpansionskoefficient och korrosivitet samtidigt som det förbättrar släckeffektiviteten. Inget av de provade frysskyddsmedlen, förutom rent vatten, uppfyller dessa villkor vilket visar hur svårpredikerad egenskaperna är.

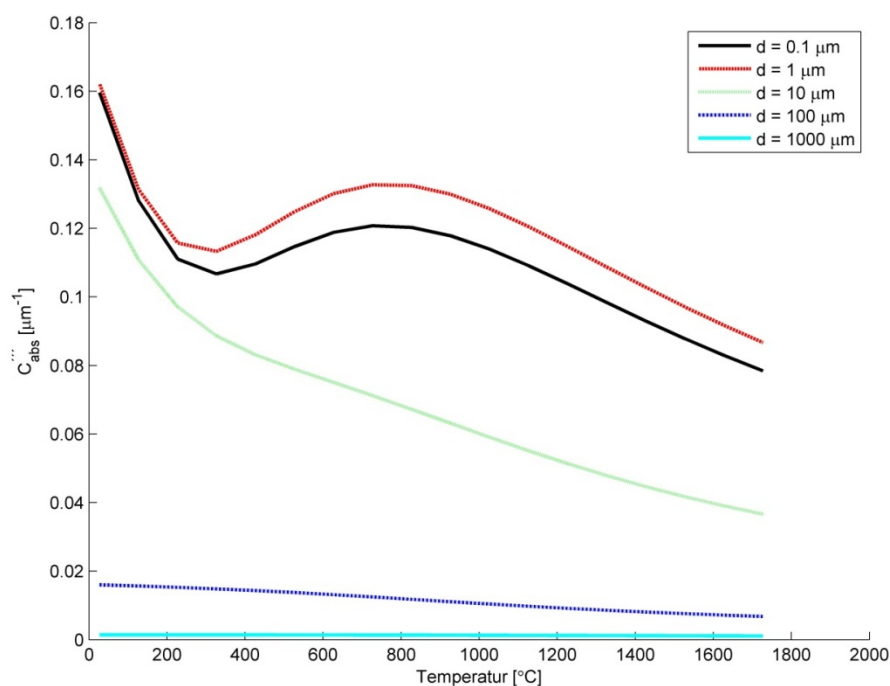
5.6 Reduktion av värmestrålning

Ridåer med vattendimma kan reducera värmeöverföringen genom värmestrålning från en brand till ett objekt som skall skyddas och därigenom fördröja eller förhindra vidare brandspridning. Detta beror på att vatten i finfördelad form effektivt absorberar värmestrålningen från branden. Försth [48] har genomfört en teoretisk och experimentell

studie av hur denna strålningsabsorption kan optimeras. Vatten är mycket effektivt vad gäller att absorbera värmestrålning men å andra sidan är den sträcka som strålningen passerar genom själva dropparna relativt kort. I projektet studerades i detalj hur strålningen absorberas i droppar och hur denna process kan optimeras.

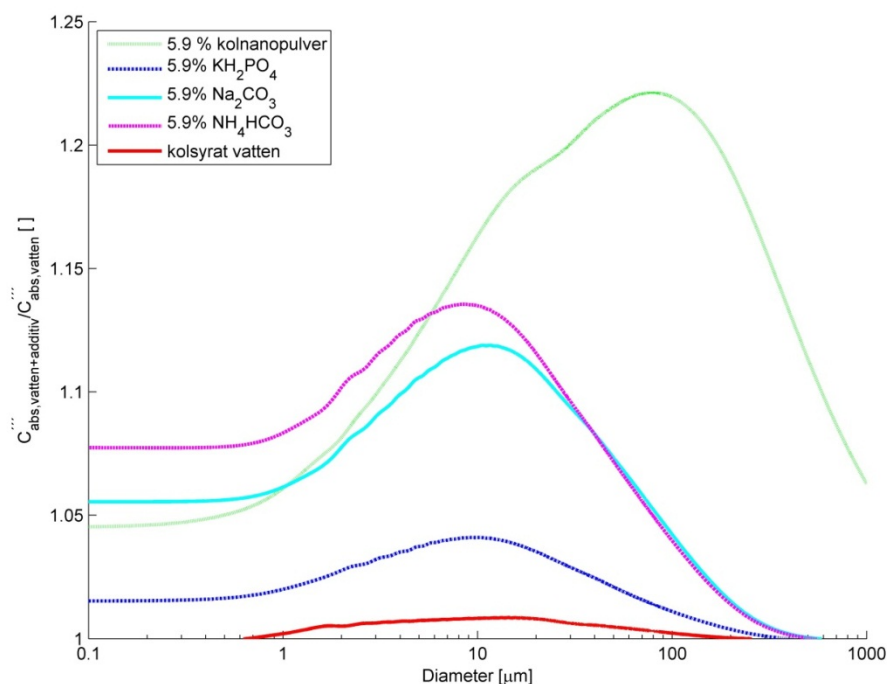
Den parameter som studerades i projektet var det så kallade volymetriska absorptionstvärnittet, som anger vilken värmeeffekt, [W], som absorberas per volymenhet vatten, [m^3], vid en given strålningsintensitet, [W/m^2]. Resultatet för olika droppdiametrar d visas i figur 29. På x-axeln anges strålningstemperaturen. Detta är temperaturen på det objekt som ger upphov till värmestrålningen, typiskt en sotig flamma eller en brinnande yta. Ju hetare ett strålände objekt är desto kortare är våglängderna i värmestrålningen. Från figuren framgår att när temperaturen ökar så minskar absorptionen. Detta beror på att vattnet absorberar mindre ju kortare våglängden är. Då våglängderna blir så korta att de befinner sig i det synliga våglängdsområdet är vatten transparent, det vill säga det absorberar väldigt lite.

Från figuren framgår också att det finns en optimal droppdiameter $d \approx 1 \mu\text{m}$ då vattendropparna absorberar strålningen mest effektivt. Så små vattendroppar kan dock vara svårt att åstadkomma i praktiken. Man bör dessutom beakta att dropparna förångas av värmestrålningen och att diametern därför varierar under en droppes livstid. För extremt små droppar är absorptionen som mest effektiv för strålningstemperaturer runt 800°C , vilket är en typisk flamtemperatur vid bränder.



Figur 29 Absorption av värmestrålning som funktion av strålningstemperaturen [48].

Huvudmålet med projektet var att studera om det är möjligt att öka absorptionen genom att tillsätta additiver till vattnet. Fem olika tillsatser undersöktes, bland annat kolnanopulver och koldioxid, dvs. kolsyrat vatten. Resultatet visas i figur 30. På y-axeln anges hur effektivt vatten med tillsatt additiv är jämfört med rent vatten. Beräkningarna är gjorda för en strålningstemperatur på 900°C .



Figur 30 Relativ absorptionseffektivitet för vatten med olika additiver som funktion av droppdiameter [48].

Som framgår av figuren kan absorptionen förbättras med cirka 5 – 20% när 5.9% additiv tillsätts till släckvattnet. Additiven ger mest effekt för diametrar i området 10 – 100 μm . Kolnanopulver är den mest effektiva tillsatsen men är å andra sidan brännbart.

Sammanfattningsvis kan sägas att vatten i sig är mycket effektivt vad gäller absorption av värmestrålning och att det därför är svårt att uppnå några större förbättringar genom tillsats av rimliga mängder additiv. Framtida forskning inom detta område bör förmodligen fokusera på icke brännbara nanopartiklar som ger upphov till multipelspridning i själva dropparna och därigenom utnyttjar vattnets egen absorption mer effektivt.

Vattenridåer kan även användas i byggnader istället för väggar eller dörrar. Cheung [49] har genomfört brandförsök för att studera utformning av vattenridåer i eller framför vertikala öppningar och hur stor strålningsreduktion som kan åstadkommas. En litteraturstudie som gjordes innan brandförsöken visade att de mest betydelsefulla parametrarna för en hög strålningsreduktion är vattendropparnas storlek, dess koncentration och vattenridån bredd. Brandförsöken utfördes i två rum som var förbundna med varandra via en vertikal öppning. Varje rum hade en längd på 4.0 meter, en bredd av 2.9 m och en takhöjd om 2.6 m. Brandkällan placerades i det ena rummet. Gastemperaturer och strålningsvärmes mättes i det angränsande rummet. Vattenridån i den vertikala öppningen mellan de båda rummen åstadkoms med flatstrålemunstycken. De parametrar som studerades var olika munstyckstryck, flödet, brandens storlek samt olika munstycken. Termoelementen i det angränsande rummet visade att vattenridå hade en bra kylförmåga, men kylningen var oberoende av munstyckstrycket.

Studien visade att vattenridån inte består av ett kontinuerligt lager med vatten. I utrymmet mellan vattendropparna kan varma brandgaser passera. Försöksresultaten visade att strålningsreduktionen ökade från 36% till 57% när vattentrycket ökades från 4 bar till 6 bar. Den relativa förbättringen av strålningsreduktionen ökade också när brandeffekten

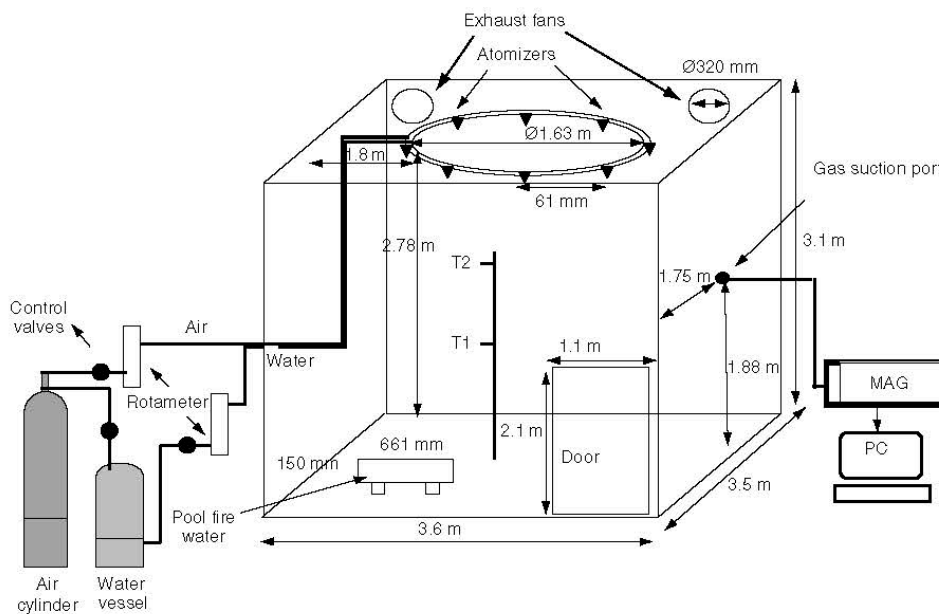
ökades. Munstycket med den mindre munstycksöppningen (3/8") reducerade värmestrålningen bättre än munstycket med större öppning (7/16").

Vattenridåer är en vedertagen teknik för att reducera för att skydda lagringstankar med till brandfarliga vätskor eller gaser. Vattenridån kan vara nedåtriktad, framför det objekt som skall skyddas eller så kan vattensprayen vara direkt riktad mot mantelytan.

Buchlin [50] har genomfört försök för att undersöka effektiviteten för båda alternativen. Resultaten visar att en eller flera vattenridåer effektivt kan reducera strålningsnivåerna. Effektiviteten ökar med antalet munstycken i vattenridån en reduktion med mellan 50% och 75% kan förväntas. En typisk massflöde är 2 kg/s (120 liter/minut) per längdmeter. Om vattensprayen istället riktas så att den träffar mantelytan förbättras strålningsdämpningen och kan vara så hög som 90%. Detta kräver dock ett visst avstånd mellan munstyckena och mantelytan så att vattensprayerna från de enskilda munstyckena överlappar varandra. Det typiska vattenflödet är mellan 0.15 till 0.25 kg/s per kvadratmeter (9 till 15 liter/minut och kvadratmeter).

5.7 Samband mellan tid till släckning och vattendroppstorlek och brandeffekt

Målsättningen med studien var att förstå effekten av vattendimma vid brandsläckning av poolbränder med heptan i ett slutet försöksrum med 40 m³ volym. Effekten av volymsflöde och vattendroppstorlek på temperaturen i rummet och tid till släckning studerades med olika brandstorlek [51]. Försöksrummet var 3.5 m × 3.6 m × 3.1 m (H) och byggt av armerad betong som invändigt var klätt med tegelsten för att begränsa värmeöverföringen till omgivningen. Rummet hade två fönster för visuella observationer och dörrar för åtkomst före och efter försök, se figur 31.



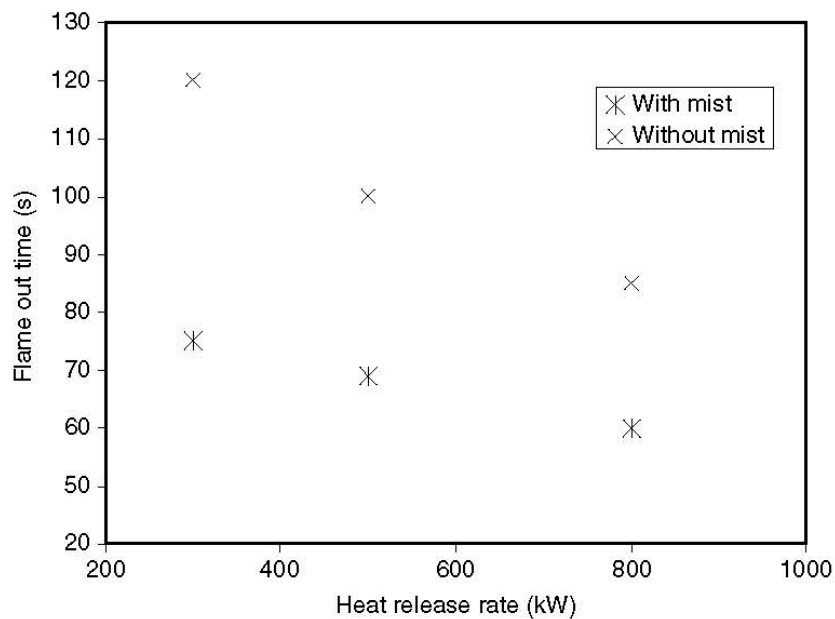
Figur 31 Försöksrummet om 40 m³ med försöksutrustning och instrumentering [51].

Gastemperaturen i försöksrummet mättes med två termoelement, 1.5 m respektive 2.5 m över golvnivå. Koncentrationerna av syre (O₂), kolmonoxid (CO) och koldioxid (CO₂) mättes 1.88 m över golvet.

Åtta stycken munstycken installerades på en cirkelformat rör placerat 2.8 m över golvet. Munstyckena atomiserade vattnet pneumatiskt med hjälp av tryckluft. Det maximala vattentrycket vid munstyckena var 2 bar och det maximala lufttrycket 6 bar. Genom att reglera lufttrycket kunde vattendroppstorleken varieras medan ett konstant vattenflöde om 1 liter/minut per munstycke bibehölls. Vattendroppstorleken mättes med laserutrustning utan brand.

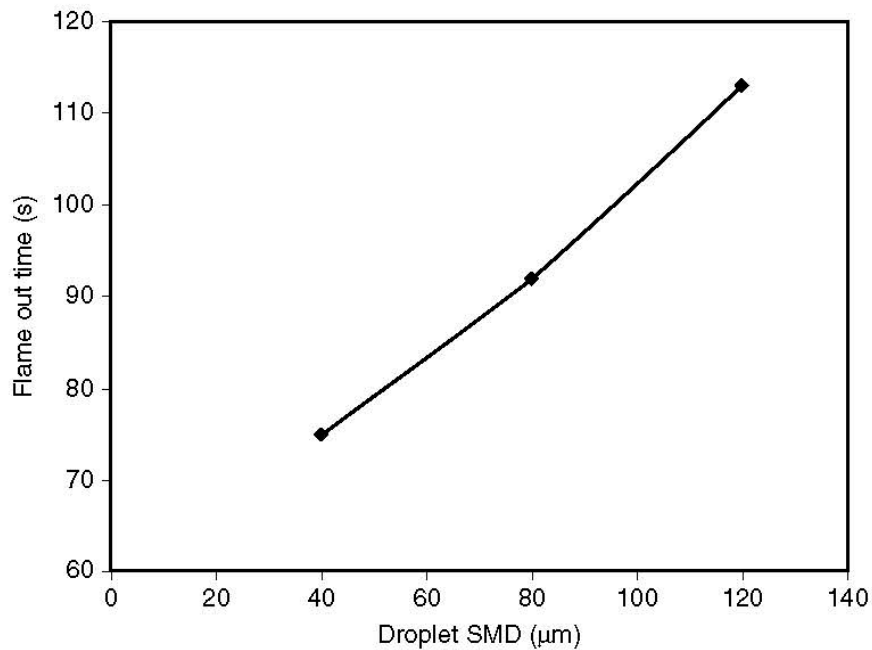
Vid brandförsöken applicerades vattendimma med SMD (Sauter Mean Diameter) om 40 μm , 80 μm respektive 120 μm . Branden anlades i cirkulära baljor med 460 mm, 560 mm och 660 mm diameter vilket motsvarade en beräknad brandeffekt om 300 kW, 500 kW respektive 800 kW. Baljan placerades på ett 313 mm högt stativ och nära (150 mm) ett av rummets hörn. Förbrinntiden innan systemet aktiverades var 20 sekunder och tiden till släckning dokumenterades. Därefter ventilerades försöksrummet manuellt. Utöver försöken med vattendimma gjordes fribrinnande försök där branden tilläts självsläckna.

Sambandet mellan tid till släckning och brandeffekt studerades med en droppstorlek om 40 μm , se figur 32. Resultaten visar att tiden till släckning var kortare med vattendimma än i de fribrinnande försöken och minskar med ökande brandeffekt i båda fallen.



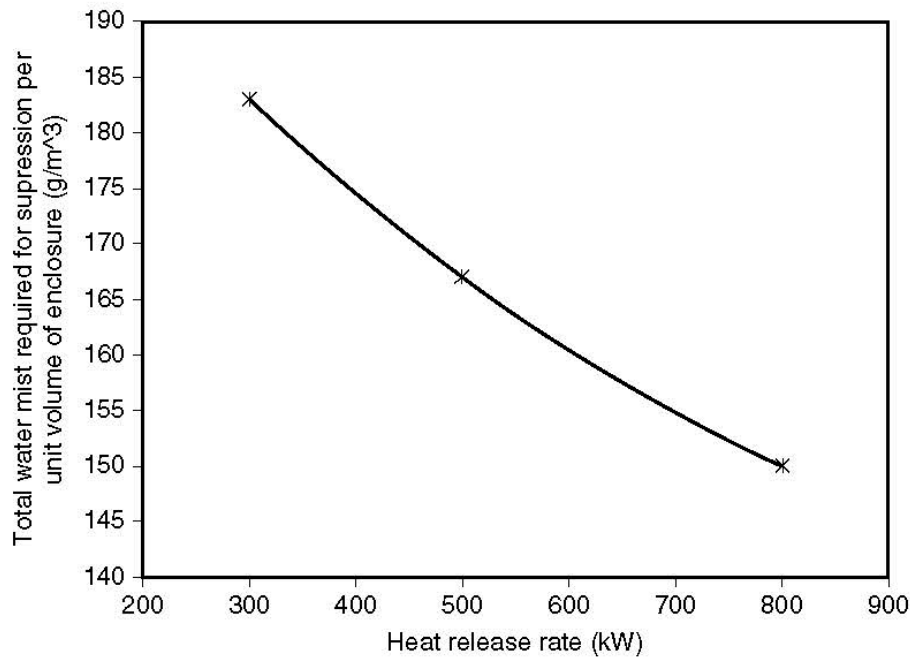
Figur 32 Sambandet mellan tid till släckning (Y-axeln) och brandeffekten. Grafen visar både fribrinnande försök och försök med vattendimma med en droppstorlek om 40 μm . Tiden till släckning var kortare med vattendimma än i de fribrinnande försöken och minskar med ökande brandeffekt i båda fallen [51].

Sambandet mellan tid till släckning och vattendroppstorleken studerades med en 300 kW brand, se figur 33. Resultaten visade att kortare tid till släckning erhöles med mindre vattendroppar.



Figur 33 Sambandet mellan tid till släckning (Y-axeln) och vattendroppstorleken för en 300 kW brand. Grafen visar att kortare tid till släckning erhöles med mindre vattendroppar [51].

För att uppskatta hur mycket vattendimma som krävs för att släcka en brand i ett utrymme beräknades den totala massan vatten (för 40 μm vattendroppar) genom att multiplicera vattenflödet med tiden till släckning och sedan dividera detta värde med försöksrummets volym. Resultatet som funktion av brandeffekt redovisas i figur 34.



Figur 34 Sambandet mellan den totala massan vattendimma (med 40 μm vattendroppar) och brandeffekten i försöksrummet som var 40 m^3 [51].

Resultaten från försöken visar att förångningen av vatten till vattenånga ger en utspädning av luft och brandgaser. Detta reducerar i sin tur förbränningsprocessen, något som i försöken visade sig i en ökning av koncentrationen av kolmonoxid (CO). Detta menar man är den primära släckmekanismen för vattendimma i slutna utrymmen. Studien visar också att det finns ett samband mellan större bränder och kortare tid till släckning. Detta kan tillskrivas den större värmemängd som är tillgänglig för förångning av vattendropparna vilket leder till att en inert miljö snabbare uppnås. Därför minskar också den kritiska koncentrationen av vattendimma när brandeffekten ökar. Små vattendroppar är effektivare än större droppar eftersom de enklare transporteras till flammans förbränningszon och förångas snabbare.

6 Goda såväl som mindre goda erfarenheter från verkliga installationer

6.1 Inledning

I detta kapitel redovisas goda såväl som mindre goda erfarenheter från verkliga installationer. Vad gäller de mindre goda erfarenheterna är syftet att det skall gå att dra lärdom av dem så att de inte upprepas. Under varje rubrik är därför händelsen kommenterad. Informationen är hämtat dels från öppen information från konferenser, arbetsgrupper eller liknande samt via kontakter med svenska besiktningsföretag.

6.2 Goda erfarenheter

6.2.1 Branden ombord på Star Princess

Den 23 mars 2006, cirka klockan 03:09 på morgon utbröt en brand i ett passagerarutrymme midskepps babordssidan av kryssningsfartyget Star Princess. Fartyget var på väg från Grand Cayman till Montego Bay i Jamaica med 2690 passagerare och 1123 mans besättning [52].

Branden startade sannolikt av en kvarglömd cigarett som antände brännbart material på en balkong på däck 10 (inom brandzon 3). Branden spred sig snabbt till närliggande balkonger och på grund av stark vind spred den sig vidare till balkonger på däck 11 och 12 inom cirka sex minuter. Efter ytterligare 24 minuter hade branden spridit sig till brandzon 5. Brandspridning skedde också till hytterna när glaset i balkongdörrarna krossades av värmen från branden. Fortsatt brandspridning förhindrades tack vare den låga brandbelastningen i hytterna och det automatiska sprinklersystemet. Passagerarna evakuerades till fartygets samlingsstationer, teatrar, restauranger och andra publika utrymmen i ungefär sju timmar. Evakueringen var enligt uppgift ordnad och livbåtar sänktes ned men användes aldrig eftersom branden kunde begränsas och släckas och fartyget tog sig för egen maskin till hamn i Montego Bay.

Branden orsakade omfattande brandskador i upp till 150 hytter och rökskador i åtminstone 100 hytter på passagerardäck 9 till 12. En 72-årig passagerare omkom på grund av inandning av rök och toxiska gaser. Tretton andra passagerare fick vårdas för rökskador.

Alla invändiga utrymmen på fartyget var försedda med ett vattendimsystem (högtryck). Systemet uppfyller kraven enligt SOLAS och var godkänt av ett flertal klassningssällskap. Systemet underhölls i enlighet med kraven i NFPA 750. Rörsystemet i passagerarutrymmena var trycksatt med vatten till 25 bars tryck. Varje munstycke hade glasbulb med en nominell aktiveringstemperatur om 57°C och den maximala täckningsyta för varje munstycke var 16 m². Flödesvakter i rörsystemet detekterade det initiala flödet i systemet när ett eller flera munstycken aktiverade och en pumpenhet med högtryckspumpar startade automatiskt. Pumparna hade kapacitet för ett maximalt tryck om 140 bar och för samtliga munstycken inom en 100 m² verkningsyta (minst sex munstycken). Om trycket sjunker under 80 bar startar ytterligare pumpar. Systemet var dimensionerat för en maximal verkningsyta om 280 m² (minst 18 munstycken) med ett minsta tryck om 60 bar.

Vid branden aktiverades uppskattningsvis 168 stycken munstycken och systemet var i drift i fyra timmar för att kyla den brandutsatta arean. Vattnet från munstyckena skapade

en barriär mot branden med ett systemtryck omkring 48 bar med två stycken pumpenheter i automatisk drift och genom att en tredje pumpenhet startades manuellt för att öka trycket i systemet. Omkring 300 ton vatten över tre däck och tre brandzoner användes under de fyra timmar systemet var igång.

Brandskadorna i hytterna var värst omedelbart innanför balkongdörren men avtog längre in i utrymmet. Den effektiva kylningen av brandgaser illustrerades av att oskadad choklad hittades vid många sängbord och att sängar och inredningsmaterial föreföll brända men var bara färgade av sot som tvättats ut brandgaserna av vattendropparna. De mest omfattande brandskadorna dokumenterades i en hytt där ett munstycke inte aktiverat. Värmen från branden hade deformationer vägpanelerna och dörren till korridoren var också deformationer och nära att ge vika.

Ett mindre antal munstycken i brandutsatta hytter aktiverade inte. Dessa munstycken demonterades och undersöktes av tillverkaren. Undersökningen visade att sju av de åtta munstycken som inte aktiverat orsakats av att vätskan i glasbulben läckt ut. Detta kan bero på att glasbulben skadat under transport, vid installationen eller efter installationen. Det åttonde munstycket som inte aktiverat orsakades av att gångorna på munstycket var skadat. Det gjorde att munstycket inte skruvats in ordentligt i sin gänganslutning och därmed inte öppnat den inbyggda backventilen.

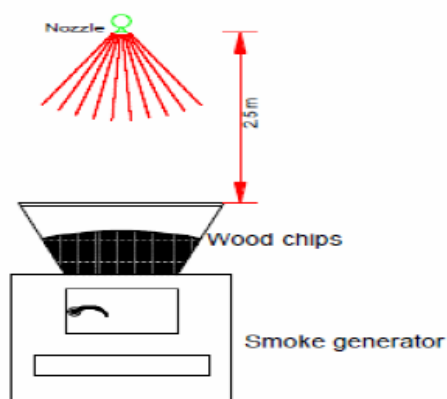
Rapporten drar slutsatsen att den kombinerade effekten av vattendimsystemet och den begränsade användningen av brännart material i hytterna förhindrade att branden spred sig från balkongerna och vidare in i fartyget. Sprinklersystem på fartyg var dimensionerade för en verkningsyta om 280 m². De 168 munstycken som aktiverade täckte en yta som motsvarande över 2000 m². Trots att systemtrycket sjönk under normala nivåer varefter fler munstycken aktiverade så var trycket tillräckligt för att förhindra vidare brandspridning in i fartyget.

Kommentar: Efter denna brand agerade International Maritime Organization (IMO) snabbt och införde krav på att sprinkler och brandlarm skall installeras på utvändiga balkonger på passagerarfartyg. Branden visar att ett system installerat i hytterna klarade att förhindra brandspridning in i fartyget, trots att betydligt fler munstycken aktiverade än vad pumparna var dimensionerade för.

6.2.2 Släckt brand i korvfabrik

Tulip är ett företag i den välkända Danish Crown gruppen av köttförädlingsbolag med huvudkontor i Danmark och produktion i Danmark, Tyskland, Sverige, Storbritannien och Polen. På grund av den hårda marknadskonkurrensen har bolaget arbetat mycket aktivt för att höja produktiviteten i sina anläggningar och en av åtgärderna är att förhindra oavsiktliga produktionsstopp.

Som en konsekvens av tre stora bränder under 2007 och 2008 i slakterier och bearbetningsanläggningar i Danmark och Tyskland har Danish Crown gruppen undersökt möjligheterna att förebygga bränder eller reducera dess konsekvenser med kostnadseffektiva medel. Som ett led i detta projekt inbjöds flera företag att lämna förslag på kostnadseffektiva lösningar för ett antal identifierade brandrisker. En av de identifierade riskerna var rökgeneratorer för smaksättning av korv och den föreslagna lösningen var ett automatiskt lågtryckssystem med vattendimma. Figur 35 visar placeringen av ett munstycke över en av generatorerna.



Figur 35 Placering av munstycke ovanför en av rökgeneratorerna som används för att smaksätta korv. Foton publicerade med benäget tillstånd av Novenco Fire Fighting AS.

Söndagen den 24 oktober 2010, när personalen hade lämnat fabriken för helgen, bröt en brand ut i en av de elva rökgeneratorerna på Tulips korvfabrik i Svenstrup i Danmark. Brandlarmsystemet, med rökdetektorer, larmade tjänstgörande personal som skyndade att inspektera platsen och den möjliga orsaken till branden. Vid ankomsten till lokalen var den fylld med svart rök och en distinkt lukt av bränt trä, men ingen brand hittades. Efter en grundlig granskning kunde man konstatera att det ena munstycket över rökgeneratoren där branden startat hade aktiverat. Inga ytterligare munstycken hade aktiverat. På en av väggarna noterades ett tydligt sprutmönster där vattnet från munstycket hade tvättat bort röken. Tack vare brandlarmssystem och vattendimmsystemet kunde produktionen, förutom i den rökgenerator där branden startat, fortsätta utan avbrott måndagen efter händelsen [53].

Kommentar: Ett bra exempel där rätt placering av munstycke, snabb aktivering och låga vattenflöden förhindrar omfattande brand- och vattenskador.

6.3 Mindre goda erfarenheter

6.3.1 Automatiska munstycken på passagerarfartyg som inte aktiverar

Efter branden ombord på Scandinavian Star år 1990 när 158 människor omkom restes krav på bättre brandskydd på passagerarfartyg. Några år senare kom också krav på automatiska sprinklersystem, branddetektion och utrymningslarm i passagerarutrymmen. Kraven gäller fartyg i internationell trafik med fler än 36 passagerare och såväl nybyggda som äldre (enligt speciell tidsplan) fartyg. Här var IMO förutseende och genom att ta fram installationsregler och provningsmetoder öppnade man möjligheterna för alternativa, "ekvivalenta" sprinklersystem. Sedan början av 1990-talet har alltså automatiska sprinklersystem installerats på i princip alla nybyggda och äldre passagerarfartyg. Marknaden har omfattat hundratals fartyg. Eftersom traditionella sprinklersystem kräver större rördimensioner och större vattenmängder har de flesta system som installerats varit av typen vattendimma.

Enligt de krav som återfinns i bland annat IMO MSC.1/Circ.1432 skall minst två stycken automatiska munstycken regelbundet provas för att avgöra om de aktiverar eller ej. Detta prov görs normalt mycket enkelt genom att aktivera ett installerat munstycke med en liten gasbrännare. I slutet av 2012 informerade Det Norske Veritas (DNV), ett av de

klassningssällskap som gör regelbundna säkerhetskontroller på fartyg, samtliga flaggstater att man erfarit att automatiska munstycken av ett särskilt fabrikat och typ haft en hög felfrekvens vid provning. Resultaten från fyra passagerarfartyg äldre än tio år indikerade en felfrekvens mellan 30% och 47% av de munstycken som provades [54]. DNV såg därför ett behov att utöka den regelbundna funktionsprovningen av munstycken och kartlägga om den höga felfrekvensen bara gäller ett fabrikat och typ av munstycke eller om det är ett generellt problem för vattendimsystem. DNV har därför utökat sina så kallade Statutory Interpretations (lagstadgade tolkningar) med en bilaga som innehåller anvisningar för hur många munstycken från varje sektion som skall provas och hur resultaten skall bedömas. Som utgångspunkt skall minst två munstycken från minst 10 sektioner, det vill säga totalt minst 20 munstycken, provas vid den årliga inspektionen. Man rekommenderar också att ett vattenprov tas för att bedöma vattenkvaliteten ombord. Om vattenkvaliteten inte uppfyller de krav som ställs av installatören av sprinklersystemet skall vattnet i vattentankarna bytas och samtliga rör rensas. Om utbyte av samtliga munstycken blir aktuellt skall även då vattnet bytas ut och rör rensas [55].

Tillverkaren av munstyckena beskriver problemen med munstyckena i en kvalitetsbulletin [56]. Problem anses bero på invändig kontaminering, till exempel beroende på vattenkvalitet, som gör att pistong och O-ringar fastnar i munstyckskroppen.

Kommentar: Erfarenheten från detta exempel visar hur viktigt det är att alla delar av ett system regelbundet funktionsprovas, även de automatiska munstyckena. I just detta fall är det sannolikt en kombination av konstruktionslösningen i munstycket och bristfällig vattenkvalitet som förorsakat problemet. För traditionella sprinklersystem i landanläggningar rekommenderar SS-EN 12845:2004+A2:2009 [57] och Brandskyddsföreningens tilläggsdokument SBF 120:7 [58] att en inspektion av våtrörsystem görs senast 25 år efter installationen. För torrörsystem är kravet senast tio år efter installationen. Kontrollen innebär bland annat att ett antal sprinkler från varje system skall demonteras och funktionsprovas. Detta bör förstås även tillämpas för vattendimsystem.

6.3.2 Ändring i produktdatablad efter besiktningsanmärkning

Traditionella sprinkler som installeras i till exempel kontorsbyggnader, köpcenter, industrilokaler eller lagerlokaler projekteras, installeras och besiktigas enligt rekommendationer i till exempel SS-EN 12845:2004+A2:2009, "Fasta släcksystem - Automatiska sprinklersystem - Utförande, installation och underhåll" eller NFPA 13, "Standard for the Installation of Sprinkler Systems". Rekommendationerna är mycket detaljerade, till exempel avseende hur systemet skall dimensioneras, hur vattenförsörjningen skall utformas och hur sprinkler skall installeras. En förklaring är att traditionell sprinklerteknik är relativt standardiserad.

För system av typen vattendimma finns motsvarande krav i SIS-EN/TS 14972:2011, "Fasta släcksystem - Vattendimsystem - Utförande och installation" och NFPA 750, "Standard on Water Mist Fire Protection Systems". Dessa rekommendationer är i vissa stycken detaljerade men i andra hänseenden hänvisas till den enskilda tillverkarens eller installatörens produktdatablad och installationsmanual.

En förekommande anmärkning vid besiktning av vattendimsystem är att det horisontella avståndet från ett automatiskt munstycke till närliggande vägg eller avståndet mellan munstycken överskrider vad som anges i systemets produktdatablad. Istället för att flytta munstycket och/eller komplettera med ytterligare munstycken har det förekommit att installatören istället redovisar ett reviderat produktdatablad som medger ett större avstånd

än vad det ursprungliga produktdatabladet angivit. Eftersom underlaget till förändringarna inte redovisas är relevansen svår att bedöma för besiktningsmannen.

Kommentar: Det kan tyckas rimligt att förändringar av produktdatablad bör styrkas med till exempel brandförsök eller att förändringen av produktdatablad tredjepartsgranskas av någon sakkunnig.

6.3.3 Igensättning av systemets huvudfilter

Vid en besiktning av ett system installerat i en byggnad provkördes en pump. Pumpen var ansluten till det kommunala vattenledningsnätet via ett filter. Efter bara några minuter började pumpen att gå sämre och den slogs av. Orsaken till detta var att huvudfiltret var igensatt. Anledningen visade sig vara att kommunen vid samma tillfälle genomförde reparationsarbeten på vattenledningsnätet i närheten av byggnaden. Vattnet var därför något förorenat och filtret var inte dimensionerat för detta.

Kommentar: Normalt har vatten från det kommunala vattenledningsnätet en hög renhetsnivå. Händelsen visar dels att filterkapacitet bör dimensioneras för fall med sämre renhet och dels hur viktigt det är att pumpar provkörs.

6.3.4 Olyckstillbud med utläckande kvävgas

Kvävgas kan användas som en ren drivgas, för att pneumatiskt sönderdela vatten i ett systems munstycken, bidra till släckningen i det skyddade utrymmet och/eller för så kallade gasdrivna pumpar. Gasen lagras vanligen i gasflaskor med mellan 200 bars och 300 bars tryck. Oavsett hur kvävgasen används i systemet kommer gasen att strömma in i det skyddade utrymmet. Beroende på utrymmets volym finns det en personsäkerhetsrisk förknippad med att syrekoncentrationen i utrymmet reduceras. Vid dimensioneringen av ett system säkerställs därför att syrekoncentrationen i det skyddade utrymmet inte understiger kritiska nivåer vid en brand eller vid en oavsiktlig aktivering.

Nedanstående två händelser visar dock att det finns personsäkerhetsrisker även i det utrymme där tryckkärlen med kvävgasen lagras. Byggnaden, som är en kulturhistoriskt värdefull byggnad helt i trä, är försedd med sprinkler såväl invändigt som utvändigt. Munstyckena placerade på yttertak och fasader aktiveras via signal från en värmedetektionskabel placerad dels under takfot och dels en bit över marknivå. I den aktuella anläggningen är 30 stycken gasflaskor med kvävgas placerade i ett mindre, cirka 10 m², stort källarutrymme som endast är åtkomligt via en trappa från våningen ovanför. I detta teknikrum finns även en 3500 liters vattentank.

Vid det första tillbudet kom en värmedetektionskabel i kläm mellan dörrbladet och dörrkarm när anläggningsskötaren passerade genom dörren. Detta aktiverade systemet på denna fasad. Anläggningsskötaren noterade dock omedelbart att fullt systemtryck inte erhöles och skyndade till teknikrummet för att stänga av systemet. I teknikrummet var det dock "ett himla väsen". På grund av ett tekniskt fel strömmade nämligen kvävgasen ut i rummet. Anläggningsskötaren stängde av systemet och utrymde eftersom han kände sig yr i huvudet.

Vid det andra tillbudet, som inträffade på julafton cirka klockan 21:00 några år efter det första tillbudet, brast en rörkoppling i teknikrummet och hela utrymmet fylldes med vatten och kvävgas. Räddningstjänsten larmades till platsen via ett automatiskt larm. Redan invid trappan på våningen ovanför kände sig en brandman yr och gick därför inte ned i utrymmet. Utrymmet ventilerades med räddningstjänstens mobila fläktar.

Anledningen till att rörkopplingen brast visade sig vara att en så kallad skärring i rörkopplingen monterats felvänd.

Efter dessa båda tillbud har man installerat ett separat gaslarm i teknikutrymmet som larmar om syrekonzentrationen sjunker.

Kommentar: Två allvarliga tillbud som visar att slutna utrymmen utan direkt utgång till det fria är olämpliga för lagring av trycksatta inertgaser. Om utrymmet istället vetter mot det fria går det att installera tryckavlastningsventiler som öppnar vid ett gasutflöde och ventilerar utrymmet. Öppning av dörr till utrymmet bidrar också till ventilation när någon tillträder utrymmet. I just detta fall kräver dessutom utbyte, demontering för inspektion och provtryckning, etc. av gasflaskorna en besvärlig arbetsinsats. Det är också viktigt att samtliga eller enstaka gasflaskor kan ersättas inom en rimlig tidperiod så att inte byggnaden står utan brandskydd.

6.3.5 Felaktivering av fasadskydd

Byggnaden som beskrivs ovan har alltså öppna munstycken monterade på fasaden. Munstyckena aktiveras gruppvis från en signal från en värmedetektionskabel placerad dels under takfot och dels en bit över marknivå. På en av fasaderna översteg lufttemperaturen kabelns aktiveringstemperatur och sektionen aktiverades. Inga vattenskador förorsakades. Värmedetektionskabeln byttes därefter mot en med högre detektionstemperatur.

Kommentar: En relativt vanlig erfarenhet som dokumenterats i tidigare Brandforsk-projekt, se referens [59].

6.3.6 Vattenskada vid fullskaleprov

Vid idrifttagning av ett gruppaktiveringssystem (deluge-system) i en verkstadsindustri genomfördes ett fullskaleförsök. En otät koppling orsakade dock en vattenskada. Vid besiktningen visade det sig också att den offererade och ”godkända” systemlösningen var ändrad till en annan lösning utan att slutkunden meddelats.

Kommentar: Otätheter i ett system kan uppdagas på mindre dramatiska sätt om rörsystemet och ventiler provtrycks. För ett gruppaktiveringssystem krävs att alla anslutningar för munstycken pluggas eftersom systemet per definition har öppna munstycken. Enligt NFPA 750 skall provtryckning göras vid 150% av det normala arbetstrycket under två timmar. Att offererad systemlösningen ändras bör självklart meddelas kund, inte bara ur ett entreprenadjuridiskt perspektiv utan även för att den nya systemlösningen kan vara säkerhetsmässigt sämre.

6.3.7 Igensatta munstycken vid anslutning till befintlig vattenkälla

Vid installation i en verkstadsindustri föreslog en installatör av kostnadsskäl att systemet kunde anslutas direkt till befintlig vattenkälla för vattensprinkler. Resultatet blev att munstycken blev igensatta eftersom vattenkvalitén (och möjligen även filterkapaciteten i systemet) inte var tillräckligt hög.

Kommentar: Munstycken för vattendimma har små munstycksöppningar som är mycket känsliga för igensättning. Detta fall är ett konkret exempel på att så är fallet.

6.3.8 Problem med rörkoppling, fördelning av vattendroppar, igensättning av filter, etc.

Vid idrifttagning av ett gruppaktiveringssystem (deluge-system) i en verkstadsindustri genomfördes ett fullskaleförsök. Vid det första försöket brast en rörkoppling på en matarledning. Vid det andra försöket visade det sig att vattendropparna inte fördelade sig jämnt i rummet på grund av många skärmande installationer, trots en försäkran från installatören att vattendimma skulle "sugas" in under nämnda hinder. Det visade sig också att systemets certifikat inte var applicerbart för aktuell lokal, bland annat var rumsvolymen för stor och verksamheten en annan. Vatten till systemet togs från ordinarie sprinklerbassäng via en rörledning i ståltubskvalitet vilket gjorde att systemets huvudfilter sattes igen.

Kommentar: Provtryckning och igensättning kommenteras i ovanstående exempel. Det hävdas ofta att vattendimma har så små vattendroppar att de fördelar sig jämt i ett rum. Detta kräver dels mycket små vattendroppar, normalt mindre än 20 µm och att munstycken är placerade så att de genererar ett luftflöde i rummet. I normala fall är huvuddelen av vattendropparna i en vattenspray för stora för att följa luftströmmarna i ett rum och munstyckena är normalt heller inte placerade så att de skapar den omrörningseffekt som krävs. Det bör dock påpekas att det råder andra förhållanden vid en brand. Dels kan branden i sig bidra till en omrörningseffekt i rummet. Dessutom förångas vattendroppar. Vattenånga och de brandgaser som genereras av branden kan mycket väl fördela sig relativt homogent i ett rum vilket gör att släckning av mer eller mindre dolda bränder är möjligt. Tillämpning av försöksdata för en rumsvolym till en större rumsvolym är förstås möjlig inom rimliga gränser. I sådana fall bör åtminstone systemet varaktighet ökas. En bedömning bör också göras om provbränderna från brandförsök är relevanta för den aktuella tillämpningen. I detta fall verkar en sådan bedömning saknas.

6.3.9 Upprepad igensättning av huvudfilter

Detta exempel är också hämtat från en verkstadsindustri. Efter varje gång systemet provats sätts filtren igen helt och måste rengöras. Anledningen är bland annat att man anslutit matningen till pumparna i botten på en gammal "dricksvattenledning". Allt sediment hamnar alltså i vattendimsystemets huvudfilter.

Kommentar: Återigen ett exempel på problem med igensättning av filter. I detta fall förefaller det även som om placeringen av anslutningspunkten bidrar till att vattnet är extra förorenat.

6.3.10 Utformning av returvattenledning

Detta exempel är hämtat från en installation i ett sjukhus. Vid provkörning av pumpar (mot stängd ventil) tas vatten från ett antal sammankopplade glasfibertankar medan returvattnet enbart går tillbaka till en av tankarna vilket får till följd att denna bräddar över och vattnet hamnar i avloppet. Efter ett sådant försök saknas vatten i alla tankar utom den som får returvattnet. Det är inte små mängder som går ut i avloppet och måste ersättas.

Kommentar: Högryckspumpar kan till skillnad mot centrifugalpumpar inte provköras mot stängd ventil utan vatten måste ledas till avlopp eller cirkuleras tillbaka till tank eller motsvarande. I detta fall borde returledningen ha dragits till samtliga tankar. Vid provkörning av pump är normalt förfarande att pumpen går en längre tid för att säkerställa att den är funktionsduglig.

7 Diskussion och slutsatser

Sedan den tidigare litteraturstudien om vattendimma i SP Rapporten 2001:26, ”Släcksystem med vattendimma – en kunskapssammanställning” [1] har teknikutvecklingen gått framåt och tekniken tillämpas numera för brandrisker där man för drygt tio års inte trodde att ”vattendimma” var möjligt att använda. Det har därför funnits ett behov av att återigen sammanställa, dokumentera och göra ny kunskap och erfarenheter tillgänglig för en bredare krets.

Denna rapport beskriver de senaste årens teknikutveckling inom området, redovisar erfarenheter och resultat från verifierande försök för olika tillämpningar, beskriver installationsregler samt provningsmetoder med dess tillämpningar och ger exempel på goda såväl som dåliga erfarenheter från verkliga installationer.

Rapporten omfattar bara fast installerade system. Det finns aktuella sammanställningar om manuella system, till exempel rapporterna [60, 61].

7.1 Nya tillämpningar

Vägtunnlar är en tillämpning där sprinkler inte är eller varit särskilt vanlig. Ökad trafik på det europeiska vägnätet, allt fler tunnlar och inte minst flera allvarliga tunnelbränder har banat väg för sprinkler i vägtunnlar. System med vattendimma har lanserats som ett alternativ till traditionella sprinkler- eller vattenspraysystem och på senare år har flera omfattande fullskaliga försöksserier genomförts. Försöken visar att systemens fördelar framförallt är kylning av varma brandgaser och förhindrande av brandspridning till närstående fordon.

En liknande tillämpning är skydd av parkeringsgarage för personbilar. Flera försöksserier visar att vattendimma är jämförbart med traditionella sprinklersystem, trots att avståndet mellan munstyckena ofta är större och vattentätheten lägre.

Undertak- och övergolvsutrymmen där den primära brandrisken och brandbelastningen utgörs av elkablar på kabelstegar är en annan tillämpning där vattendimma kan användas som ett alternativ till traditionella sprinkler. I dessa fall är munstyckena optimerade för att ge en bra täckning och aktiverar dessutom snabbare än traditionella sprinkler tack vare lägre nominell aktiveringstemperatur och lägre RTI-värde.

Skydd av fängelseceller är en ytterligare tillämpning där vattendimma kan passa bra, både som fast installerade automatiska system och för manuell brandsläckning. Ett problem i fängelser är risken för avsiktlig åverkan på munstycken eller att de utnyttjas för att fästa upp ett rep eller en snara. Det finns automatiska (med glasbulb) munstycken på marknaden för fängelseceller eller vårdrum där intagna är självmords- eller självskadebenägna. Munstycket är konstruerat så att det svårt att skruva isär. Om hållaren för glasbulben utsätts för en last om 150 N (cirka 15 kg) aktiverar munstycket.

7.2 Ny teknik

Ny teknik på marknaden inkluderar system där vattendropparna alstras i en generator med en patenterad teknik bestående av bland annat en oscillerande platta. Jämfört med ett system med hydraulisk sönderdelning av vattnet är vattendropparna betydligt mindre, i storleksordningen mindre än 10 μm jämfört med 50 – 150 μm . Det här innebär att vattendropparna får fysikaliska egenskaper som liknar en gas, de följer luftströmmar och kan distribueras runt obstruktioner. Andra system kombinerar vattendimma och inertgas,

vanligen kvävgas. Kvävgasen har flera funktioner, dels används den som en drivgas för att trycka vattnet från ett tryckkärl ut i systemets rör, dels används den för att sönderdela vattnet till mycket små vattendroppar vid munstycket och slutligen bidrar den till släckeffektiviteten genom att syrekonzentrationen i utrymmet reduceras. Hastigheten genom munstyckena är hög och omblandningen i det skyddade utrymmet är god. Eftersom vattenmängderna är mycket små minskar risken för vattenskadorna.

7.3 Additiver och frysskyddsmedel

Även om vatten är ett effektivt släckmedel kan olika additiver väsentligt förbättra släckförmåga. Försök i mindre skala med ett olika additiver visar att alkalimetallsalter är mycket effektiv även vid måttliga koncentrationer.

Tillsats för att förhindra frysning (frysskyddsmedel) är en annan tillämpning där farhågorna istället är att medlet skall försämra släckeffektiviteten. Alla frysskyddsmedel har fördelar såväl som nackdelar och begränsningar. I vissa fall är begränsningarna sådana att ett visst frysskyddsmedel vid en viss koncentration inte är användbar för vattendimmsystem. I andra fall dikterar den specifika tillämpningen och utformningen av systemet huruvida frysskyddsmedlet är användbart eller ej. Generellt ökar frysskyddsmedel densiteten, viskositeten, den volymetriska expansionen och korrosiviteten samt reducerar ytspänningen jämfört med rent vatten. Propylenglykol, glycerin och betain tillför energi till en brand och ökar därmed brandeffekten medan kaliumacetat förbättrar släckeffektiviteten jämfört med rent vatten.

7.4 Reduktion av värmestrålning

Ridåer med vattendimma kan reducera värmeöverföringen genom värmestrålning från en brand till ett objekt som skall skyddas och därigenom fördröja eller förhindra brandspridning. Detta beror på att vatten i finfördelad form effektivt absorberar värmestrålningen från branden. En teoretisk och experimentell studie av hur denna strålningsabsorption kan optimeras finns gjord. Vatten är mycket effektivt vad gäller att absorbera värmestrålning men å andra sidan är den sträcka som strålningen passerar genom själva dropparna relativt kort. Det finns en optimal droppdiameter $d \approx 1 \mu\text{m}$ när vattendropparna absorberar strålningen mest effektivt. Så små vattendroppar kan dock vara svårt att åstadkomma i praktiken. Dessutom förångas dropparna av värmestrålningen och diametern varierar under en droppes livstid. För extremt små droppar är absorptionen som mest effektiv för strålningstemperaturer runt 800°C , vilket är en typisk flamtemperatur vid bränder. Vattenridåer är en vedertagen teknik för att skydda lagringstankar med brandfarliga vätskor eller gaser. Vattenridån kan var nedåtriktad, framför det objekt som skall skyddas eller så kan vattensprayen vara direkt riktad mot mantelytan. Försök visar att det är mest effektivt om vattensprayen riktas så att den träffar mantelytan och att strålningsdämpningen då kan vara så hög som 90%.

7.5 Tillförlitlighet och branddetektion

Tillförlitligheten för system av typen vattendimma har ofta diskuterats och det finns omfattande och detaljerade felträdsanalyser som åtminstone ger en indikation om tillförlitligheten för olika systemlösningar. Vid analyserna görs en del förenklingar och antaganden och som indata används data för ingående komponenter från andra tillämpningar. En analys av FM Global visar att inverkan av enskilda komponentfel varierar med systemlösningen. Fel med stor inverkan på sannolikheten för ett systemfel är normalt att vattenkällan saknar vatten, att trycket är för lågt i drivgasbehållare, felaktiga styrinställningar, fel i brandlarmcentral eller överföringsfel, stängd huvudventil och fel i

brandlarmcentral. Mänskliga fel, som att drivgas eller vattenbehållare är tomma eller att styrinställningar är fel, är vanliga. Fel i brandlarmcentralen (förutsatt sådana används) eller överföringsfel som ledningsbrott eller anslutningsfel är generellt bland de fem största bidragen till systemfel.

Det finns även studier där tillförlitligheten för olika släcksystem på fartyg analyserats. Analysen visar ett traditionellt automatiskt sprinklersystem har en hög tillförlitlighet. Tillförlitligheten är i samma storleksordning men något lägre för system av typen vattendimma. Styrkan med en felträdsanalys är, enligt rapporten, att den i princip kan användas för vilket system som helst oavsett dess komplexitet. Svagheter är att den inte beaktar samspelet mellan komponenter och dominoeffekter. Tillförlitligheten för olika komponenter i ett system är inte nödvändigtvis oberoende, ett fel i en komponent kan fortplanta sig till nästa komponent. Av det skälet är en felträdsanalys endast en approximation av ett systems verkliga tillförlitlighet. Inte desto mindre kan metodiken ge användbara resultat när inget annat källmaterial finns till hands. Det rekommenderas att resultaten jämförs med resultat från försök eller historiska data för att verifiera beräkningsmodellen.

Flera system som beskrivs i rapporten kräver ett separat branddetektionssystem för att aktivera. Det gäller de beskrivna applikationerna; fängelse, Q-FOG, auditorium med golvmonterade munstycken och flygplanshangarer. Systemets förmåga att skapa personsäkerhet bygger till stor del på användningen av tillräckligt bra detektering med en flersensordetektor som klarar att ge detektering tidigt även i problematisk miljö (till exempel storrökare). Något som ofta inte förefaller klarlagt är hur en 'sen' detektering påverkar släckfunktionen och ändå ger tillfredställande säkerhet för den eller de personer som ska skyddas. Branddetektionen betydelse och avsaknaden av information kan medföra risker för dåliga lösningar, både om systemet är alltför känsligt (risk för felaktivering) och kanske i ännu högre grad om det är alltför okänsligt.

7.6 Både bra och dåliga erfarenheter

Erfarenheterna från verkliga installationer visar att det både finns bra och dåliga erfarenheter. I båda fallen går det förstås att dra lärdom av erfarenheterna och förbättra system, praxis, underhållsrutiner, etc. Några av de fall som redovisas i rapporten är sannolikt inte specifika för just system av typen vattendimma, till exempel att en systemlösning offereras och att en annan lösning installeras men är ändå intressanta att redovisa ur ett helhetsperspektiv.

Risk för igensättning av filter och munstycken var en av de farhågor som särskilt lyftes fram när tekniken med vattendimma introducerades på bred front i början av 1990-talet. Erfarenheterna som dokumenteras här visar att dessa farhågor har besannats i ett flertal installationer och att risken bör beaktas vid installation. Två allvarliga tillbud visar att slutna utrymmen utan direkt utgång till det fria är olämpliga för lagring av trycksatta inertgaser. Om utrymmet istället vetter mot det fria går det att installera tryckavlastningsventiler som öppnar vid ett gasutflöde och ventilerar utrymmet. Öppning av dörr till utrymmet bidrar också till ventilation när någon tillträder utrymmet.

Det finns även exempel när automatiska munstycken (med glasbulb) inte aktiverat vid fältprovning. Det visar hur viktigt det är att alla delar av ett system regelbundet funktionsprovats, även de automatiska munstyckena. För traditionella sprinklersystem i landanläggningar krävs att ett antal sprinkler från varje system demonteras och funktionsprovats. Detta bör förstås även tillämpas för vattendimmsystem.

Referenser

- 1 Arvidson, Magnus och Hertzberg, Tommy, "Släcksystem med vattendimma – en kunskapssammanställning", SP Rapport 2001:26, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
- 2 Mawhinney, J. R. and Trelles, J., "Testing water mist systems against large fires in tunnels: Integrating test data with CFD simulations", NFPA Suppression and Detection (SUP-DET) Technical Working Conference, Orlando, Florida, February 25-27, 2009
- 3 Kratzmeir, Stefan, "Road tunnel protection by water mist systems: Implementation of full scale fire test results into a real project", ISTSS 2008, 3rd International Symposium on Tunnel Safety and Security, Stockholm March 12-14, 2008
- 4 Mawhinney, Jack R., "Fixed Fire Protection Systems in Tunnels: Issues and Directions", Fire Technology, published online April 8, 2011
- 5 "Brandversuche für Tiefgaragen (OH2)" (Fire Tests for Underground Car Parks (OH2)), VdS Schadenverhütung, July 2, 2004
- 6 "Brandversuche für Tiefgaragen (OH2)" (Fire Tests for Underground Car Parks (OH2)), VdS Schadenverhütung, revised version March 1, 2012
- 7 Arvidson, Magnus, "Vattendimma för skydd av parkeringsgarage", Brandposten Nr 42, 2010
- 8 "Prevent Systems utførte branntester for parkeringshus/garasjer hos SP i Sverige", www.prevent-systems.no (2014-06-16)
- 9 Arvidson, Magnus, Ingason, Haukur and Persson, Henry, "Water Based Fire Protection Systems for Vehicle Decks on Ro-Ro Passenger Ferries, BRANDFORSK Project 421-941", SP Report 1997:03, Swedish National Testing and Research Institute, 1997
- 10 Arvidson, Magnus, "Large Scale Ro-Ro Vehicle Deck Fire Test, NORDTEST Project 1299-96, BRANDFORSK Project 421-941", SP Report 1997:15, Swedish National Testing and Research Institute, 1997
- 11 Video entitled "Large Scale Ro-Ro Vehicle Deck Fire Test, Conducted at SP on the 23rd of May 1997", Swedish National Testing and Research Institute, Borås, 1997
- 12 Arvidson, Magnus och Torstensson, Håkan, "En förstudie angående vattenbaserade släcksystem för lastutrymmen på fartyg" SP Rapport 2002:22, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
- 13 Resolution A.123(V), "Recommendation on fixed fire extinguishing systems for special category spaces", International Maritime Organization, London, United Kingdom, October 26, 1967
- 14 Friberg, F., Hansen, G., et al, "Extinction of Fire in Ships by Automatic Sprinkler Systems and Fixed Pressure Water-spraying Systems", Denmark,

June 1963

- 15 Shipp, M., Annable, K. and Williams, C., "Assessment of the Fire Behaviour of Cargo Loaded on Ro-Ro Vehicle Decks in Relation to the Design Standards for Fire Suppression Systems", BRE Fire and Security, Client report number 227974, November 3, 2006.
- 16 Arvidson, Magnus, "Large-scale ro-ro deck fire suppression tests", SP Report 2009:29, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
- 17 Arvidson, Magnus, "Large-scale water spray and water mist fire suppression system tests for the protection of ro-ro cargo decks on ships", Fire Technology, Vol. 46, Number 1, 2013
- 18 "New pop-out sprinkler", Railway Interiors International, June 2011
- 19 Annable, Kelvin and Shipp, Martin, "Fire safety in prison cells – fuel loading and fire suppression systems", Prepared for Ministry of Justice, Client report number 242536, BRE Global Ltd, 25 April 2008
- 20 Annable, Kelvin and Shipp, Martin, "Fire safety in prison cells – effectiveness of water mist systems", Prepared for Ministry of Justice, Client report number 246912, BRE Global Ltd, 31 October 2008
- 21 "Fire tests for false floors and false ceilings as a completion of the fire tests "office, OH1" and similar", VdS Schadenverhütung, December 6, 2007
- 22 Adiga, K.C., and Khawaja, Nadeem A., "Ultra Fine Water Mist Total Flooding Fire Tests", Paper presented at the 8th International Water Mist Conference, Copenhagen, Denmark, September 16-19, 2008
- 23 Adiga, K. C. and Hatcher, Robert F Jr., et al, "Electronic Space Fire Protection: False Deck Mockup Fire Testing of NanoMist Systems", Proceedings FROM Halon Options Technical Working Conference, Albuquerque, NM, 2005
- 24 "Lätt monterbara automatiska släcksystem", Räddningsverket (nuvarande MSB) och Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, Juni 2007
- 25 "Brandsäker bostad för alla, Vägledning för individanpassat brandskydd", Myndigheten för samhällskydd och beredskap, Publikationsnummer MSB550, 2013
- 26 Norling, Mats, "Prison cell nozzle and functional test of an automatic sprinkler nozzle", presentation vid International Water Mist Conference, 2012.
- 27 "Ultra high pressure water mist test nozzle", letter from BRE Global to Anders Kjellberg at Ultra Fog AB, dated March 15, 2010
- 28 Kopp, Rüdiger, "Innovative Fire Protection, for Concert Halls", International Water Mist Conference, London, 2009
- 29 Palle, Carsten, "Low pressure water mist technology for large volume applications", Paper presented at the International Water Mist Conference, Madrid, 2003

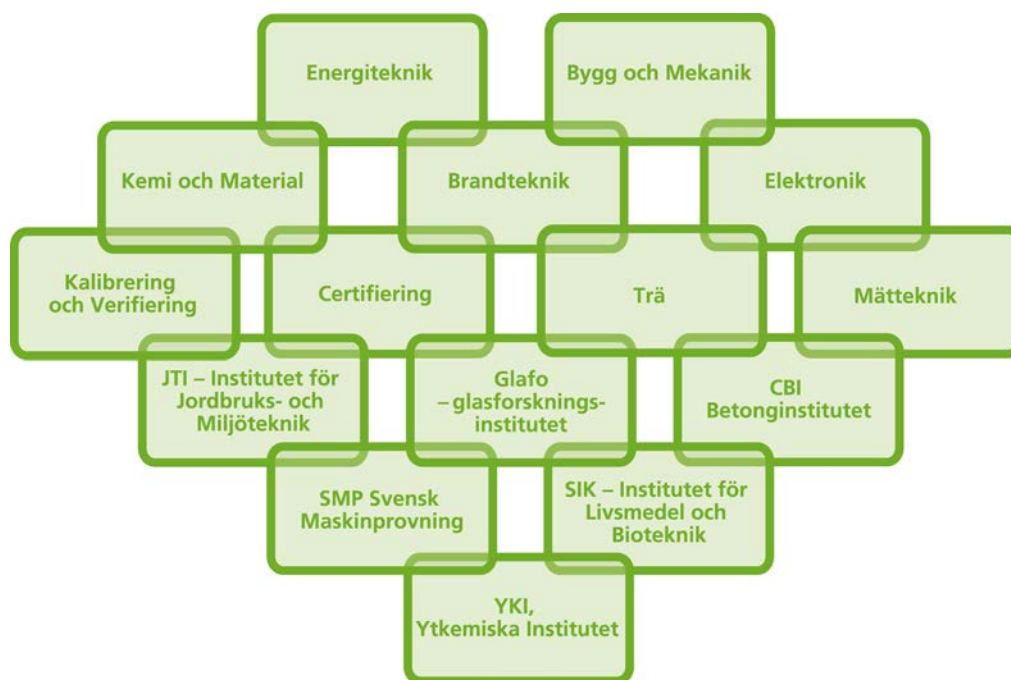
- 30 "Fire test summary #19/ACH/MAY02, HI-FOG systems for aircraft hangar protection", Marioff Corporation Oy, September 4, 2002
- 31 Mawhinney, Jack R., "Date Line 2012: Issues and Future Directions for Water Mist Fire Protection Systems", Fire Protection Engineering, May 2012
- 32 UL 2167, "Standard for Water Mist Nozzles for Fire Protection Service", UNDERWRITERS LABORATORIES INC., First Edition December 27, 2002
- 33 FM 5560, "Approval Standard for Water Mist Systems", Class Number 5560, FM Approvals LLC, November 2012
- 34 FM 5580, "Approval Standard for Hybrid (Water and Inert Gas) Fire Extinguishing Systems", Class Number 5580, FM Approvals LLC, November 2012
- 35 Teknisk specifikation SS-CEN/TS 14972:2011, "Fasta släcksystem – Vattendimsystem – Utförande och installation", 2011-12-28
- 36 Xu, Shuzhen and Fuller, David, "WATER MIST FIRE PROTECTION RELIABILITY ANALYSIS", FM Global
- 37 Lohtmann, Phillip, Kar, Apurba, Breuillard, Antoine, "Probabilistic Framework for Onboard Fire Safety – Reliability and Effectiveness Models of Passive and Active Fire Safety Systems", January 13, 2011
- 38 Cueff, Christian, Le Gac, Christian and Lucas, Gilles, "Challenges to protect confined and cluttered environments like submarine compartments with water mist", 9th International Naval Engineering Conference and Exhibition, CCH, Hamburg, Germany, April 1 – 3, 2008.
- 39 Mötesanteckningar från möte med Christian Cueff och Laurent Pinoche samt besök vid CNPP's anläggning i Vernon, Frankrike, 25 oktober 2010.
- 40 Reinhardt, John, W., "The Evaluation of Water Mist with and without Nitrogen as an Aircraft Cargo Compartment Fire Suppression System", DOT/FAA/AR-01/121, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, February 2002
- 41 Joseph, Paul, Nichols, Emma and Novozhilov, Vasily "A comparative study of the effects of chemical additives on the suppression efficiency of water mist", Fire Safety Journal, Volume 58, 2013, pp. 221-225
- 42 Liu, Jianghong and Cong Beihua, "Experimental Evaluation of Water Mist with Metal Chloride Additives for Suppressing CH₄/Air Cup-Burner Flames", Journal of Thermal Science, Volume 22, No. 3 (2013), pp. 269–274
- 43 Moore, Ted A., Weitz, Carrie A. and Tapscott, Robert E., "An Update on NMERI Cup-Burner Test Results", Proceedings from the Halon Options Technical Working Conference, 1998
- 44 Senecal, Joseph A., "Revised NFPA Cup-Burner Test Method: Improving Reproducibility", Combustion Research Center, Kidde-Fenwal, Inc., 2005

- 45 "Antifreeze Solutions in Home Fire Sprinkler Systems", Literature Review and Research Plan, The Fire Protection Research Foundation, June 2010
- 46 Arvidson, Magnus, "Flammability of antifreeze agents for automatic sprinkler systems", Journal of Fire Protection Engineering", Volume 21, Issue 2, May 2011, pages 115-132
- 47 Connolly, Matthew S., Jaskolka, Stephen M., Rosen, Jeffrey S., Szkutak, Michael D., "Engineering Performance of Water Mist Fire Protection Systems with Antifreeze", Worcester Polytechnic Institute, 26 April 2012
- 48 Försth, Michael and Möller, Kenneth, "Absorption of heat radiation in liquid droplets", SP Report 2011:75, ISBN 978-91-87017-07-0
- 49 Cheung, W.Y., "Radiation Blockage of Water Curtains", International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Number 1, 2009, pp.7-13
- 50 Buchlin, Jean-Marie, "Thermal Shielding by Water Spray Curtains", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 18, Number 4-6, July - November 2005, pp. 423-432
- 51 Suresh Lal, Meenakshi Gupta, A. Kushari, J.C Kapoor and S. Maji, "Suppression of pool fire in a large enclosure with water mist", International journal of spray and combustion dynamics, Volume 5, Number 3, 2013, pp. 181-200
- 52 "Report on the investigation of the fire onboard Star Princess off Jamaica 23 March 2006", Department of Maritime Administration (Bermuda) and Marine Accident Investigation Branch (United Kingdom), Report No 28/2006, October 2006
- 53 Christensen, Eric, "XFlow® water mist system preserves and enhances productivity at a TULIP Sausage factory in Svenstrup Denmark", proceedings from the International Water Mist Conference, 2011
- 54 "Testing of water mist systems onboard passenger vessels", letter from Det Norske Veritas to Flag Administrations, 2012-11-06
- 55 "DNV STATUTORY INTERPRETATIONS", Det Norske Veritas, February 2013
- 56 QUALITY BULLETIN Number 002/2012, "Potential failure to activate", Marioff Corporation Oy, 2012
- 57 SS-EN 12845:2004+A2:2009, "Automatiska sprinklersystem – Utförande, installation och underhåll", SIS
- 58 SBF 120:7 "Regler för automatiskt vattensprinklersystem", Brandskyddsföreningen
- 59 Arvidson, Magnus, "An overview of fire protection of Swedish wooden churches, Brandforsk project 500-061", SP Report 2006:42, ISBN 91-85533-28-9

- 60 "Skärsläckarkonceptets operativa användande", Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, publikationsnummer MSB 0167-10, 2010
- 61 "Förmåga och begränsningar av förekommande släcksystem vid brand i byggnad: Fokus på miljöarbete", publikationsnummer MSB618, 2013

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Vi arbetar med innovation och värdeskapande teknikutveckling. Genom att vi har Sveriges bredaste och mest kvalificerade resurser för teknisk utvärdering, mätteknik, forskning och utveckling har vi stor betydelse för näringslivets konkurrenskraft och hållbara utveckling. Vår forskning sker i nära samarbete med universitet och högskolor och bland våra cirka 10000 kunder finns allt från nytänkande småföretag till internationella koncerner.



SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Box 857, 501 15 BORÅS

Telefon: 010-516 50 00, Telefax: 033-13 55 02

E-post: info@sp.se, Internet: www.sp.se

www.sp.se

Mer information om SP:s publikationer: www.sp.se/publ

Fire Research

SP Rapport 2014:30

ISBN: 978-91-87461-76-7

ISSN 0284-5172