

Magnus Arvidson  
Tommy Hertzberg

# Släcksystem med vattendimma – en kunskapssammanställning

Brandforsk projekt 509-991



Magnus Arvidson  
Tommy Hertzberg

# Släcksystem med vattendimma – en kunskapssammanställning

Brandforsk projekt 509-991

Magnus Arvidson  
Tommy Hertzberg

## **Släcksystem med vattendimma - en kunskapssammanställning**

**Brandforsk projekt 509-991**



SP Rapport 2001:26  
Brandteknik  
Borås 2001

## Abstract

### A progress report on water mist fire protection systems

Progress in respect of research and application of water mist systems has been substantial over the last decade. This report contains a review of water mist fire protection technology, the fundamentals of extinguishing mechanisms, droplet sizes, the use of additives and health aspects. It also summarises the content and requirements of internationally recognised fire test procedures as well as installation guidelines, and reviews recent experiences from fire testing for different applications such as machinery spaces, gas turbines, residential buildings, marine accommodations and public spaces, heritage buildings, electronic equipment and computer rooms, aircraft cabins and heavy goods vehicle shuttle trains.

**Key words:** Water mist, flammable liquid hazards, electronic equipment, literature survey.

**Sökord:** Vattendimma, brandfarlig vara, elektronik, litteraturstudie.

**SP Sveriges Provnings- och  
Forskningsinstitut**  
SP Rapport 2001:26  
ISBN 91-7848-870-2  
ISSN 0284-5172  
Borås 2001

**SP Swedish National Testing and  
Research Institute**  
SP Report 2001:26  
Postal address:  
Box 857, SE-501 15 BORÅS, Sweden  
Telephone: +46 33 16 50 00  
Telefax: +46 33 13 55 02  
E-mail: [info@sp.se](mailto:info@sp.se)  
Internet: [www.sp.se](http://www.sp.se)

# Innehållsförteckning

	<b>Abstract</b>	<b>2</b>
	<b>Innehållsförteckning</b>	<b>3</b>
	<b>Förord</b>	<b>5</b>
	<b>Sammanfattning</b>	<b>6</b>
	<b>Executive summary in English</b>	<b>8</b>
<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>12</b>
1.1	Projektets bakgrund	12
1.2	Projektets målsättning och genomförande	12
1.3	Fördelar med vattendimma	12
1.4	Olika sätt att sönderdela vatten	13
<b>2</b>	<b>Fysikaliska egenskaper och släckmekanismer</b>	<b>15</b>
2.1	Släckmekanismer	16
2.1.1	Gasnedkylning	16
2.1.2	Nedkylning av bränsle och potentiella brandområden	17
2.1.3	Reduktion av syrekoncentrationen	18
2.1.4	Absorption av värmestrålning	20
2.2	Definitioner av vattendroppstorlek	21
2.3	Användning av additiver	25
2.4	Hälsoaspekter	26
2.4.1	Riskerna med att inhalera rent vatten	26
2.4.2	Tillsatser till vattnet	27
2.4.3	Inverkan av brandprodukter som löses i vattnet	27
<b>3</b>	<b>Installationsregler och provningsmetoder</b>	<b>29</b>
3.1	International Maritime Organisation (IMO)	29
3.2	National Fire Protection Association (NFPA)	31
3.3	Underwriters Laboratories (UL)	31
3.4	Factory Mutual Research Corporation (FMRC)	32
3.5	Comité Europeen de Normalisation (CEN)	33
3.6	Australian Standard AS 4587 - 1999	33
<b>4</b>	<b>Marknadsöversikt – olika aktörer på marknaden</b>	<b>35</b>
4.1	Tillverkare av system och exempel på systemkomponenter	35
4.2	Möjligheter till ytterligare kunskapsinhämtning inom området	37
4.2.1	International Water Mist Association (IWMA)	37
4.2.2	Halon Options Technical Working Conference	37
4.2.3	Det Norske Veritas (DNV)	38
<b>5</b>	<b>Tillämpad forskning och utveckling för specifika applikationer</b>	<b>39</b>
5.1	Fartygsmaskinrum och gasturbiner	39
5.1.1	Fartygsmaskinrum	39
5.1.2	Gasturbiner	45
5.1.3	Motorprovrum för jetmotorer	47
5.2	Rumsmiljö, låg- och normal riskklass	48
5.2.1	Passagerarfartyg	49

5.2.2	Bostäder	50
5.2.3	Stavkyrkor	53
5.2.4	Bibliotek	53
5.3	Kabeltunnlar	55
5.4	Elektronik och datorhallar	56
5.4.1	Skydd av telekommunikationsväxlar	56
5.4.2	Skydd av datorkabinett	57
5.4.3	Skydd av kabinett med elektronik och i övergolv	59
5.4.4	Släckning och rökastvättning i datorhallar	60
5.4.5	Skydd av renrum i halvledarindustrin	62
5.5	Transport, fordon, tåg och flygplan	63
5.5.1	Släcksystem för transportvagnar i Eurotunneln	63
5.5.2	Flygplanskabiner	66
<b>6</b>	<b>Förslag till fortsatta insatser</b>	<b>68</b>
6.1	Beräkningsmodell	68
6.2	Verifierande försök	68
	<b>Referenser</b>	<b>69</b>

## Förord

Detta projekt är initierat och finansierat av Brandforsk (projektnummer 509-991). Referensgruppen för projektet utgjordes av den fasta referensgruppen för ”Släckmedel”. Följande personer ingick:

Anders Danielsson	AB Förenade Brandredskap
Mats Helltegren	Svenska Skum AB
Göran Holmstedt	Lunds Tekniska Högskola
Anna-Maria Larsson	NOHA Försäljnings AB Sweden
Birger Lennmalm	Brand & Riskteknik HB
Leif Ljung	Svenska Petroleum Institutet
Sören Lundström	Räddningsverket
Bengt Lydersson	Sjöfartsverket
Per Lindblad	SAAB Military Aircraft
Mats Rosander	Räddningsstjänsten Helsingborg
Mariette Schelander	Försäkringsbolaget Zürich
Ragnar Wighus	Norges Branntekniske Laboratorium
Johan Åqvist	Försvarets Materielverk
Anders Wallin	Brandforsk
Henry Persson	SP Brandteknik
Bror Persson	SP Brandteknik

## Sammanfattning

Brandforsks referensgrupp för släckmedel uttryckte vid ett möte under 1999 starka önskemål att Brandforsk initierar en litteraturstudie angående användningen av vattendimma, med fokusering på landbaserade installationer. Man kan se ett växande intresse att använda vattendimma i många olika applikationer och det finns ett stort kunskapsbehov bland användare, brandkonsulter, myndigheter och andra. Samtidigt finns det väldigt lite skrivet på svenska.

Projektets målsättning var att genomföra en omfattande litteraturstudie för att försöka ge en översikt av befintlig teknik, beskriva olika typer av system, släckmekanismer, droppstorleksfördelning, vedertagna provningsmetoder och att redovisa erfarenheter från verifierande försök för olika typer av tillämpningar.

Sammanfattningsvis visar den utveckling som skedde under 1990-talet att vattendimma har potentialen att ersätta eller vara ett alternativ till traditionella släcksystem. Det finns även goda möjligheter att använda vattendimma för andra typer av brandrisker, där det kanske inte finns några bra alternativa lösningar. Vatten har många fördelar, det är billigt, inte toxiskt och utgör ingen fara för den yttre miljön. Erfarenheterna visar att vattendimma kan dämpa eller släcka pool- och spraybränder i brandfarlig vara och att det kan användas som ett alternativ till traditionell sprinkler.

Vatten är ett mycket effektivt släckmedel, främst för dess förmåga att absorbera värme, både som ämne och vid fasövergången från vätskefas till gasfas. Släckmekanismerna kan i huvudsak sägas bestå av fyra olika delar:

1. Nedkylning av gasen i området kring branden.
2. Nedkylning av bränsle och potentiella brandområden.
3. Reduktion av syrekoncentrationen.
4. Absorption av värmestrålning.

De två sistnämnda punkterna har störst genomslag vid bränder i slutna utrymmen med låg grad av ventilation. Absorptionen av värmestrålning sker främst om vattnet tillförs branden i form av (små) vattendroppar.

Fartygsmaskinrum och utrymmen med gasturbiner tillhör de tillämpningar där det finns oerhört många brandförsök genomförda. Gemensamt för dessa tillämpningar är att den primära brandrisken utgörs av läckande bränsle, smörjolja eller hydraulolja som kommer i kontakt med heta ytor och antänds. De flesta studier som gjorts redovisar ungefär samma slutsatser; (1) stora bränder släcks snabbt, (2) mindre bränder kräver längre tid till släckning och (3) mindre bränder som är dolda för direkt vattenpåföring av olika obstruktioner är svårsläckta.

Vilket är att föredra, system som producerar relativt små vattendroppar eller system med något större vattendroppar? Detta är en frågeställning som ofta kommer upp. Här finns inget entydigt svar men resultaten från försök pekar mot att mindre vattendroppar gynnar förmågan att släcka mindre, dolda, bränder. Större vattendroppar bidrar till lägre känslighet för inverkan av ventilationen till det skyddade utrymmet. Däremot är skillnaderna i kylning av atmosfären i utrymmet ringa förutsatt att det föreligger en viss "överkapacitet" i vattenflöde.



Elektronik, elutrustning och datorhallar har traditionellt skyddats med gassläcksystem såsom halon 1301 eller koldioxid. Brand i sådana miljöer tillväxer oftast relativt långsamt och det är snarare röken, inte värmen från branden, som är det stora problemet. Ett antal studier finns gjorda där vattendimma har provats för den typen av applikationer. Bränderna är i allmänhet alldeles för små för att förånga vattendropparna, varför direkt applikation av vatten till den brinnande ytan är en förutsättning för släckning. Därför krävs att munstycken monteras i datorkabinettet eller elskåpet. Det finns dock system på marknaden som är utvecklade för tvättning av rök och brandsläckning. Dessa system kräver dock ett visst tillskott av inertgas (normalt kvävgas) för släckning.

System med vattendimma har även börjat användas i miljöer där traditionell sprinkler varit det vanliga, framförallt i det som brukar kallas låg och normal riskklass, alltså bostadsmiljöer, kontor, restauranter och liknande. Erfarenheterna från framförallt passagerarfartyg visar att systemen rent prestandamässigt är jämförbara med sprinkler, men att de kan dimensioneras med lägre vattenflöden. Vissa specialtillämpningar har också provats med gott resultat, till exempel stavkyrkor och bibliotek.

Standardiseringen inom området har kommit rätt långt, men har inte alltid hunnit med den snabba teknikutvecklingen. Det var inom det internationella sjösäkerhetsorganet IMO som man var först med att ta fram installationsregler och provningsmetoder för vattendimma. Deras arbete har därefter fått stå modell för liknande regler från bland annat NFPA, UL och CEN. Gemensamt för samtliga dessa är att ingen anger exakt hur systemen skall dimensioneras (mer än krav på specifik verkningsyta och varaktighet hos vattenkällan).

Många specialtillämpningar kräver att man genomför brandförsök på ett sätt som är representativt för den verkliga applikationen, dels för att uppfylla de skyddsmål som man ställer upp och dels för att optimera systemet. Trots den mångfald av brandförsök som finns genomförda kommer det även fortsättningsvis att finnas ett stort behov av realistiska brandförsök.

## **Executive summary in English**

At a meeting in 1999, the Swedish Fire Research Board's Reference Group for Extinguishants expressed a strong wish that the Board should initiate a literature study of the use of water mist for fire protection, with particular emphasis on land-based applications. The growing interest in the use of water mist for a wide range of applications has created a substantial need for more detailed knowledge on the part of users, fire protection consultants, public authorities and other parties. At the same time, little has been published in Swedish.

The objective of the project has been to carry out an extensive study of the literature in order to try to provide an overview of existing technologies, to describe different types of systems, extinguishing mechanisms, droplet size distribution and accepted test methods, and to present experience from verifying trials for various types of applications.

Summarising, developments during the 1990s have shown that water mist has the potential to replace, or to provide an alternative to, traditional fire protection systems. Water mist is also well placed to deal with other types of fire risks, especially where there is a lack of good alternative solutions.

### **Several benefits of water mist**

Water has many advantages as a fire extinguishant; it is cheap, non-toxic and does not represent a risk to the external environment. Experience has shown that water mist can reduce or extinguish pool or spray fires of flammable substances, and that it can be used as an alternative to traditional sprinkler protection. Some of the advantages that are usually quoted are listed below.

1. Water is inexpensive.
2. It is non-toxic and poses no environmental risks.
3. Water mist systems can suppress flammable liquid pool and spray fires.
4. In many cases, the water flow rates required are significantly lower than those used in traditional sprinkler systems, which means that the risk of water damage is reduced. No toxic or corrosive breakdown products are formed during extinguishing.
5. Water mist systems may be made to perform like total flooding systems in some applications. However, compared to gaseous extinguishants, water mist will provide greater cooling of the surroundings and the protected equipment.
6. The systems can be activated during an early stage of the fire development, e.g. by means of smoke detectors.
7. Water mist have a low electrical conductive (if de-ionised water is used).
8. Water mist may have applications as inerting or explosive suppression systems.

It is important to remember that 'water mist' is not an extinguishing agent in the same sense as is, for example, a gaseous agent. The performance of a particular water mist system is very dependent on its ability to generate sufficiently small droplets and to distribute adequate quantities of water throughout the protected compartment. This depends on the droplet size, velocity, distribution and spray pattern, as well as on the momentum and mixing characteristics of the spray jet and on the geometry and other characteristics of the protected compartment.

### **Several ways of atomising water**

There are many industrial applications that involve atomising liquids into smaller droplets. Examples include the spreading of a liquid over a surface, as in spray painting, cooling and cleaning of gases, washing, humidification, combustion, etc.

There are three main principles of atomising water into smaller droplets, as described below. A wide range of various commercial nozzles is available for all of them, from several manufacturers, but for applications unconnected with fire protection.

#### Hydraulic atomisation

This involves discharging the water through one or more relatively small nozzle openings, the shape of which determines the spray pattern. This process normally works at a higher pressure, with a low flow quantity rate. At some distance from the nozzle, depending on the various designs and operating parameters, the spray changes to a fine mist. A higher water pressure usually produces smaller droplets. The water pressures of up to 100 bar that are often used for such systems produce droplet sizes that are comparable with those produced by pneumatic atomisation (see below).

Another way of atomising the water is to make two or more jets impinge in the opening of a nozzle.

#### Pneumatic atomisation

This involves the use of compressed air (or some other gas), which is supplied to the nozzle in a separate tube. Working pressures of both the water and the air are normally low (less than about 10 bar). This principle normally produces the smallest water droplets.

#### Mechanical atomisation

A water jet from a nozzle strikes a spreader plate that breaks up the jet and distributes the water as a spray. This method of atomising the water produces the relatively largest water droplets of the three main principles. It is normally used with rather low water pressures and for traditional sprinklers. The design of the spreader plates can vary, to produce different spray patterns, although a flat, circular arrangement with slits is often used. Another variant is a cone-shaped spiral.

A number of other methods of atomising water have been developed, primarily for fire-fighting. The following are a few examples.

#### Atomisation by expanding gas

This uses compressed air (or some other gas), connected directly into the water pipe system. The gas expands at the nozzle and helps to atomise the water. It produces very small water droplets, particularly if the gas flow volume is large in proportion to the water flow volume.

### Superheated water

This method is based on heating the water in a pressure vessel to a temperature above its boiling point. However, as it is not allowed to expand, it remains in the liquid phase. The pressure in the vessel drives the water into a pipe system; when it expands through a nozzle to atmospheric pressure and room temperature, some of the water turns to steam, forming a cloud that consists of a mix of water vapour and small water droplets.

### **Extinguishing mechanisms**

Water is a very effective extinguishant, primarily due to its property of absorbing heat, both in the liquid phase and in connection with the phase change from liquid to gas. The extinguishing mechanisms can be said to consist of four main elements:

- Gas-phase cooling as the water is heated and converted into water vapour.
- Wetting and cooling of the fuel surface.
- Oxygen depletion by the formation of water vapour.
- Blocking of the transfer of radiant heat.

The two last points are the most important fire-fighting mechanisms when tackling fires in enclosed spaces with a low degree of ventilation. Absorption of thermal radiation is most effective if the water is applied to the fire in the form of (small) water droplets.

In general, cooling due to evaporation of the water proceeds more rapidly if a greater liquid film area is available and if the velocity of the droplets is higher, with as high a temperature difference as possible between the droplets and the ambient gas temperature. If the velocity of the droplets relative to the surrounding gas is too low, an insulating layer is created around each droplet, consisting of gas with a high concentration of water and at a (relatively) low temperature - relative, that is, to the ambient temperature of the surroundings. This prevents full use of the energy transfer potential (i.e. the difference in energy content of the gas and the liquid), and so evaporation occurs more slowly.

The rate of evaporation is directly proportional to the available liquid surface area, which in turn depends on the size of the droplets. As the total droplet surface area is inversely proportional to the size of the droplets, it can be seen that the rate of evaporation increases rapidly as the size of the droplets decreases.

So which is better, systems that produce relatively small droplets, or those that produce somewhat larger droplets? This is a question that is often asked, and to which there is no clear answer, although the results from trials indicate that smaller water droplets improve the ability to extinguish smaller, hidden fires. Larger water droplets reduce sensitivity to the effects of ventilation in the protected area. However, provided that there is a certain amount of 'overcapacity' of water flow rate, the difference in cooling the atmosphere in the area is slight.

### **A wide range of applications**

Marine engine rooms and gas turbine enclosures belong to the applications for which a great number of fire trials have been carried out. A common feature of these applications is that the primary fire risk consists of leaks of fuel, lubricating oil or hydraulic oil coming into contact with hot surfaces and catching fire.

Most of the investigations that have been carried out come to much the same conclusions; 1) large fires are put out quickly, 2) smaller fires take longer to put out, and 3) it is difficult to extinguish smaller fires that are 'hidden' by obstructions from the direct application of water.

Electronic equipment, electrical equipment and computer rooms have traditionally been protected by gas extinguishing systems, such as halon 1301 or carbon dioxide. Fires in such environments generally spread only relatively slowly, and it tends to be the smoke, rather than the heat from the fire, that is the major problem. A number of trials of water mist for applications such as these have been carried out. The fires are generally far too small to evaporate the water droplets, and so it is the effect of direct application of the water to the burning surface that extinguishes the fire. This means that the nozzles must be fitted in the computer or electrical cubicles. However, systems are available on the market that have been developed to wash the smoke and to extinguish fires, but they require a certain input of inert gas (usually nitrogen) for extinguishing.

Water mist systems have also started to be used in environments where traditional sprinklers have been common, and particularly in areas that are usually regarded as being of low or normal risk, such as residential premises, offices, restaurants etc. Experience - particularly from passenger ships - shows that, in terms of performance, such systems are comparable with sprinklers, but can be designed for lower water flow rates. Some special applications have also been successfully tested; examples include libraries and (Norwegian) stave churches.

### **International standardisation**

Although there is a considerable degree of standardisation in this field, it has not always kept up with the rapid rate of technical development. IMO (International Maritime Organisation) was the first to publish installation rules and to specify test methods for water mist fire protection, and its work has subsequently formed a basis for similar rules from bodies such as NFPA, UL and CEN. However, a common feature of all of them is that, apart from requirements in respect of specific coverage areas and the 'duration' of the water supply, none specifies exactly how system capacities should be determined.

Many special applications necessitate fire trials being carried out in a manner that is representative of the real application, partly in order to ensure that the system fulfils the specified fire protection objectives, and partly to optimise it. However, despite the many tests that have been carried out, there will continue to be a substantial need for realistic fire trials.

# 1 Inledning

## 1.1 Projektets bakgrund

Brandforsks referensgrupp för släckmedel uttryckte vid ett möte under 1999 starka önskemål att Brandforsk initierar en litteraturstudie angående användningen av vattendimma med fokusering på landbaserade installationer.

Bakgrunden är att användningen av fasta släcksystem med vattendimma har fått sitt stora genombrott under 1990-talet. En starkt bidragande orsak är avvecklingen av halon och behovet av alternativa sprinklersystem på passagerarfartyg. Man kan se ett växande intresse av att använda vattendimma i applikationer som liknar de på fartyg, men även helt andra tillämpningar förekommer. Det finns ett stort kunskapsbehov bland användare, brandkonsulter, myndigheter och andra. Samtidigt finns det väldigt lite skrivet på svenska.

## 1.2 Projektets målsättning och genomförande

Projektets målsättning var att genomföra en omfattande litteraturstudie angående användningen av vattendimma. Avsikten var att fokusera på fast installerade system på land. Manuell brandsläckning täcks alltså inte in av rapporten, även om det också är ett intressant område.

Målsättningen var att inkludera minst följande delar:

- Översikt av befintlig teknik och beskrivning av olika typer av system.
- Beskrivning av släckmekanismer, droppstorleksfördelning, hälsoaspekter, mm.
- Redovisa erfarenheter från verifierande försök för olika typer av tillämpningar, t ex låg- och normal riskklass, maskinrum, brandfarlig vara, elektronik.
- Redovisa erfarenheter från försök med ”okonventionella” system, användning av tillsatsmedel, inblandning av inertgaser, etc.
- Översikt av vedertagna provningsmetoder och installationsstandarder.

Litteraturstudien skulle även ge underlag för att bedöma de områden där fortsatta experimentella eller teoretiska insatser är nödvändiga.

## 1.3 Fördelar med vattendimma

Den utveckling som skedde under 1990-talet visar att ”vattendimma” har potentialen att ersätta eller vara ett alternativ till traditionella släcksystem. Det finns även goda möjligheter att använda vattendimma för andra typer av brandrisker, där det kanske inte finns några bra alternativa lösningar. I referens [1] och [2] listas en rad fördelar som kan associeras med system med vattendimma:

1. Vatten i sig är ett billigt släckmedel vilket bidrar till att kostnaden för system med vattendimma kan hållas låg.
2. Vatten är inte toxiskt och utgör ingen fara för den yttre miljön.
3. System med vattendimma har visat sig kunna dämpa eller släcka pool- och spraybränder i brandfarlig vara.
4. Vattenflödet är ofta betydligt lägre jämfört med traditionell sprinklerteknik. Det medför lägre risk för vattenskador. Inga toxiska eller korrosiva sönderdelningsprodukter bildas vid släckning.
5. Under vissa betingelser så uppför sig systemen likt ett gassläcksystem ("total flooding"). Tills skillnad från gassläcksystem kyler vattendimma både omgivande luft och den utrustning som skyddas.
6. Systemen kan aktiveras i ett tidigt skede av ett brandförlopp, till exempel med hjälp av rökdetektorer.
7. Vattendimma har låg elektrisk konduktivitet (förutsatt att avjoniserat vatten används).
8. Det finns möjligheter att använda vattendimma för att inertera eller dämpa explosiva förlopp.

Det är viktigt att erinra att vattendimma inte är något "släckmedel" i en generell bemärkelse utan mycket systemberoende. I nedanstående kapitel diskuteras olika sätt att sönderdela vatten till mindre vattendroppar.

## 1.4 Olika sätt att sönderdela vatten

Det finns många industriella applikationer där vätskor sönderdelas till mindre droppar, till exempel för att appliceras över en yta såsom vid sprutlackering eller tillverkning av papper, för kylning och rening av gaser, tvättning, befuktning, förbränning, etc.

Det finns tre huvudprinciper att sönderdela vatten till mindre vattendroppar, se nedan. För samtliga dessa huvudprinciper gäller att det finns mängder med olika kommersiella munstycken för applikationer som inte har med brandsläckning att göra, från ett flertal tillverkare.

**Hydraulisk finfördelning.** Vatten trycks genom ett eller flera relativt små munstycksöppningar, vars utformning bestämmer vattensprayens spridningsbild. Normalt används högre arbetstryck och liten vattenmängd. På varierande avstånd från munstycket övergår sprayen till fin dimma. Högre vattentryck ger normalt mindre vattendroppar. De vattentryck upp mot 100 bar som ofta används för de system som finns på marknaden ger vattendroppstorlekar som är jämförbara med pneumatisk sönderdelning, se nedan.

Ett annat sätt att sönderdela vattnet är att låta två eller flera vattenstrålar kollidera i en munstycksöppning.

**Pneumatisk finfördelning.** Sker med hjälp av tryckluft (eller annan gas) som matas till munstycket i ett separat rör. Arbetstryck för både vatten och tryckluft är normalt låga, lägre än i storleksordningen 10 bar. Denna sönderdelningsprincip ger normalt de minsta vattendropparna.

**Mekanisk finfördelning.** Innebär att en vattenstråle från en munstycksöppning träffar en spridarplatta som sönderdelar och fördelar vattnet i en spray. Detta sätt att sönderdela vatten ger de relativt största vattendropparna av de tre huvudprinciperna. Används normalt vid relativt låga vattentryck och för traditionella sprinkler. Spridarplattorna har olika utformning för att åstadkomma olika spridningsbilder men är ofta en flat, cirkulär, slitsad skiva. En annan variant är en konformad spiral.

Ett antal andra sätt att sönderdela vatten har utvecklats i första hand för brandsläckning. Nedan ges några exempel.

**Sönderdelning med expanderande gas.** Sker med hjälp av tryckluft (eller annan gas) anslutet direkt till vattnets rörnät. Vid munstycket expanderar gasen och bidrar till att sönderdela vattnet. Denna sönderdelningsprincip ger mycket små vattendroppar, speciellt om volymsflödet gas är stor i förhållande till volymsflödet vatten.

**Överhettat vatten.** Tekniken bygger på att vatten värms upp i tryckkärl till en temperatur som ligger över dess kokpunkt. Eftersom vattnet inte tillåts att expandera bibehålls det i vätskefas. Trycket i kärlet driver ut vätskan till ett rörsystem och eftersom omgivningen håller atmosfärstryck och rumstemperatur förångas en viss mängd av vattnet. Härvid bildas ett ”moln” bestående av en blandning av vattenånga och små vattendroppar.



## 2 Fysikaliska egenskaper och släckmekanismer

Vatten är det mest använda släckmedlet av flera skäl; det är (oftast) lätt tillgängligt, det är förhållandevis billigt och det är miljövänligt. Rätt använt är det också mycket effektivt. Vatten har nedanstående fysikaliska egenskaper:

- Fryspunkt 0°C, kokpunkt 100°C.
- Densitet vid normaltemperatur, 1000 kg/m<sup>3</sup>.
- Smältvärme, 2,09 kJ/kg.
- Värmekapacitet, vätskefas 4,18 kJ/kg °C, gasfas, 2,01 kJ/kg °C.
- Ångbildningsvärme vid 100°C, 2 260 kJ/kg.
- Utvidgning vid övergång från vätskefas till gasfas vid normaltryck; cirka 1700 gånger.

Flera av dessa egenskaper gör vatten till ett effektivt medel för brandsläckning, främst kanske det användbara temperaturområdet för vätskefasen samt förmågan att absorbera värme, både som ämne och vid fasövergången från vätskefas till gasfas. Effektiviteten kan exemplifieras med några enkla energibalanser. En brand i ett mindre rum kan typiskt utveckla effekter kring 1 MW vid en övertändning, vilket i teorin (jämför informationen ovan) skulle kunna absorberas genom förångning av knappt en halv liter vatten per sekund. En annan jämförelse är att det totala värmeinnehållet hos ett bränsle (trä, plast, olja), typiskt ligger vid 20 - 50 MJ/kg, vilket skulle kunna absorberas genom att förånga i storleksordningen 10 - 20 liter vatten per kg förbränt material.

Det är dock inte nödvändigt att all utvecklad värme absorberas för att branden skall slockna; det räcker med 30 - 60 % av utvecklad effekt enligt Mawhinney et al. [3], som också citerar en rapport där den teoretiska temperaturen för flamsläckning i en diffusionsflamma angetts till ca 1600 K. Det finns också litteraturdata som ger lite olika mått på vattenbehov vid olika typer av bränder; exempelvis Grant et al. som sammanställt några olika data som anger behovet till 1,3 - 2,5 liter vatten per 'm<sup>3</sup> brand' och nedre kritisk gräns för vattentillförseln till ~4 liter per minut och kvadratmeter brandyta.

En av vattnets goda egenskaper är att det i förångat tillstånd tillför en termisk tröghet till gasfasen genom att öka gasens värmekapacitet  $c_p$ , vilket för luft ligger kring 1 kJ/kg. För vattenånga är  $c_p$  värdet enligt tabellen ovan ca 2 ggr högre än för luft. Det åtgår alltså mer energi att värma upp gasblandningen som innehåller vattenånga jämfört med torr luft.

## 2.1 Släckmekanismer

Släckmekanismerna vid användande av vatten som släckmedel har delvis redan berörts i inledningen till detta kapitel och kan i huvudsak sägas bestå av fyra olika delar:

1. Nedkylning av gasen i området kring branden.
2. Nedkylning av bränsle och potentiella brandområden.
3. Reduktion av syrekonzentrationen.
4. Absorption av värmestrålning.

De två sistnämnda punkterna har störst genomslag vid bränder i mer eller mindre slutna utrymmen med låg grad av ventilation. Absorptionen av värmestrålning sker främst om vattnet tillförs branden i form av (små) vattendroppar.

### 2.1.1 Gasnedkylning

Då vattendroppar tillförs en volym med varma gaser sker en nedkylning av gasen genom två olika fysikaliska steg:

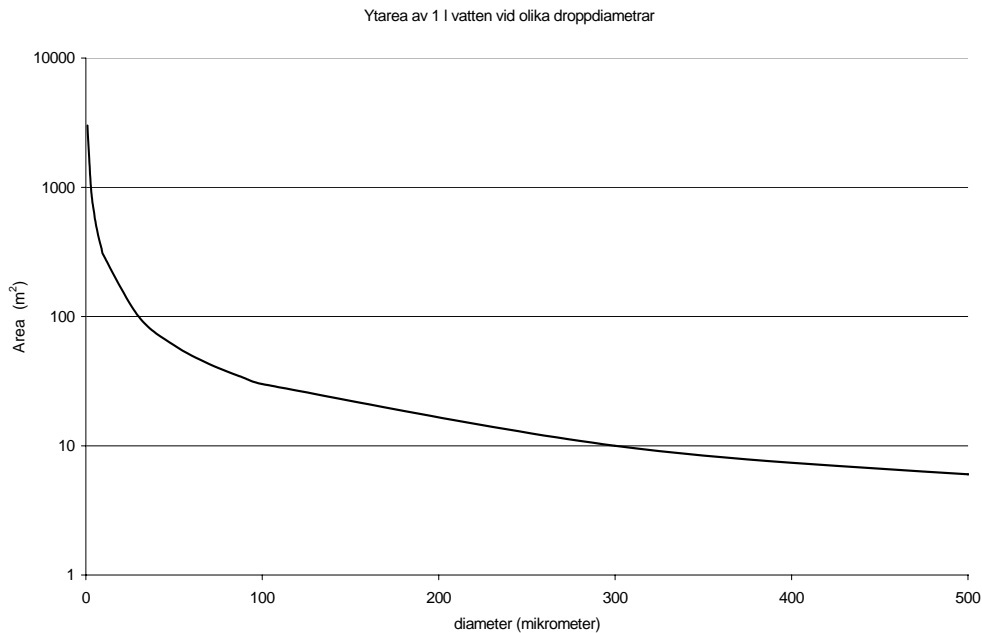
1. Förångning av vatten.
2. Värmeöverföring från brandgaser med hög temperatur och lågt värmekapacitet ( $c_p$ ) till vattenånga som håller relativt sett lägre temperatur och har högre värmekapacitet.

Vid förångning sker en energitransport från gasen till vätskan genom en motsatt riktad masstransport, dvs. vattenmolekyler i en droppe absorberar energi från gasen vilket leder till att vätskemolekyler får energi nog att lämna droppen i form av en gas. Den kopplade mass-värmeöverföringen mellan faserna beror av såväl tillgänglig vätskeyta och vätskedroppens hastighet relativt omgivande gas, som den drivande energipotentialen. Teoretiska uttryck som beskriver hastigheterna för den kopplade transporten brukar uttryckas med hjälp av den så kallade filmteorin, se till exempel Coulson-Richardsson [4] och olika dimensionslösa tal som uttrycker strömnings- och temperaturkaraktistik.

Generellt gäller att kylningen av gasen på grund av vattenförångning går snabbare ju mer vätskeyta som finns tillgänglig och ju högre dropparnas hastighet är, samtidigt som temperaturdifferensen mellan droppen och den omgivande gasen är så hög som möjligt. Skulle droppens hastighet relativt omgivande gas vara för låg, kan ett isolerande skikt bildas runt droppen, innehållande gas med hög koncentration av vatten och, relativt sett, låg temperatur. Därmed kan inte den drivande potentialen (skillnaden i energiinnehåll mellan gas och vätska) utnyttjas fullt ut och förångningen sker långsammare.

Förångningshastigheten är direkt proportionell mot tillgänglig vätskearea och denna beror i sin tur av dropparnas storlek. I nedanstående figur har logaritmen av arean hos 1 liter vatten plottats som funktion av droppstorlek (sfärisk form har antagits). Det framgår att arean, och därmed förångningshastigheten stiger kraftigt vid minskande droppstorlek.

Vid ytterligare minskad droppstorlek (betydligt mindre än  $1 \text{ mm}$ ) ökar förångningshastigheten ytterligare genom den så kallade Kelvin effekten. Detta har dock troligen ingen större betydelse för värmeabsorption vid användning av vattendimma.



*Figur 1 Beräknad total area för 1 liter vatten som funktion av vattendroppstorlek (vid beräkningen har antagits att alla vattendroppar i populationen har samma storlek).*

Den andra delen av vattnets avkylande effekt på det varma gaslagret är höjningen av värmekapaciteten ( $c_p$ ). Om man antar att vattnet som sprutas in håller 20°C och att vattnets/ångans temperatur höjs till ca 1000°C, kommer 1 kg vatten att absorbera ungefär lika mycket värme genom  $c_p$ -bidraget som genom fasomvandlingen. Bidraget är alltså inte oväsentligt.

### 2.1.2 Nedkylning av bränsle och potentiella brandområden

Nedkylning av själva brandområdet och omgivande ytor ställer andra krav på vattentillförseln än vad nedkylningen av gas gör. Gasnedkylningen blir effektivare ju mindre dropparna är, men för att kunna penetrera genom en brandplym och väta fast material behövs ett viss mått av rörelseenergi och en viss droppstorlek. Dock är det så att en nedkylning av gasen också resulterar i en minskad återstrålning och därmed en lägre bränsletemperatur. Detta kan vara särskilt betydelsefullt vid oljebränder eftersom en sänkt yttemperatur minskar oljans förångningshastighet vilket ger en lägre halt av brännbara ämnen i gasfasen vilket i sin tur minskar förbränningshastigheten.

Penetrationsförmågan hos en vattenspray har definierats [5] som den maximala sträcka en spray når i stillastående luft. Sträckan beror av vattnets rörelseenergi och det flödes (eller form) -motstånd som luftens viskositet ger upphov till. Detta motstånd leder bland annat till att större sammanhängande vätskevolym splittras upp i mindre droppar då vattnet lämnar munstycket. Vattnet kan då ha ganska hög initialhastighet men bromsas upp och når snabbt sin sluthastighet, eller terminalhastighet ( $u_t$ ), där accelerationen orsakad av gravitation, balanseras av ett bromsande formmotstånd. Hastigheten beror av gasens viskositet samt droppens diameter och densitetsskillnaden mellan faserna. Semiempiriska uttryck finns [6] för att beräkna terminalhastigheterna baserat på ett Reynolds tal för droppen, vilket ges av:

$$Re_D = \frac{D u_t}{\nu}$$

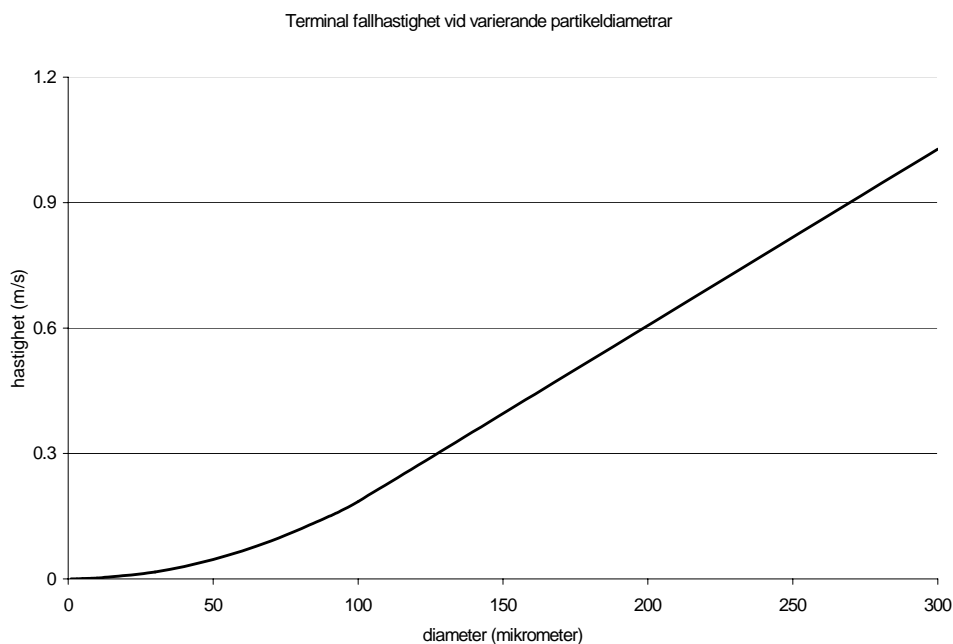
Hastigheterna kan sedan erhållas ur:

$$u_t = \frac{D^2 g}{18 \nu}, \quad Re_D \approx 2$$

$$u_t = 0.072 \frac{D^{1.6} g}{\nu^{0.4}}, \quad 2 \leq Re_D \leq 500$$

$$u_t = 3.03 \frac{D g}{\nu}, \quad 500 \leq Re_D \leq 2 \times 10^5$$

där  $\rho$  betecknar gas-densitet och  $\rho_D$  avser vattnets densitet,  $g$  = tyngd-accelerationen och  $\nu$  är gasens viskositet. I nedanstående figur har den terminala fallhastigheten plottats för varierande droppdiametrar. För exemplet har viskositet och densitet gällande för luft vid 300°C använts.



Figur 2 Terminalhastighet ("sluthastighet") för vattendroppar med olika diameter.

Penetrationslängden för en vattenspray är betydligt större än för en enskild vattendroppe eftersom det från varje droppe till gasen överförda rörelsemomentet kan utnyttjas av andra droppar. Typiska penetrationslängder finns angivna [5] till ca 2 m för droppdiametrar på 100 - 200  $\mu$ m och spraytryck på 14 - 20 bar. För system med 80 - 100 bar tryck kan den vertikala penetrationslängden vara 5 - 6 m.

Andra mätningar finns gjorda för brandsituationer [5] och penetrationslängden har då registrerats vara proportionellt mot partikeldiameter samt mot kvadraten på gasens vertikala flödehastighet i flamzonen.

### 2.1.3 Reduktion av syrekonzentrationen

Luften innehåller som bekant ca 21 % syre, vilket innebär att det tryck (partialtryck) som luftens syremolekyler upprätthåller, vid normala förhållanden (~1 atmosfär) är ca 0,21 atmosfärer. Partialtrycket av syre har stor betydelse för den hastighet med vilken luftens syremolekyler kan reagera med något ämne. Detta gäller i särskilt hög grad vid häftiga reaktionsförlopp där stor omsättning av syremolekyler sker, exempelvis vid en brand.

Om gasen tillförs ett inert ämne som kvävgas eller vattenånga så kan (förutsatt att totaltrycket inte stiger i motsvarande grad) detta leda till kraftigt sänkta reaktionshastigheter. För det fall att branden sker i ett utrymme med relativt låg grad av ventilation så kan tillförseln av vattenånga och den därmed sammanhängande minskningen av gasens partialtryck av syre, vara ett mycket effektivt sätt att släcka branden. De kemiska reaktionshastigheterna minskar som följd av minskad tillgång på syre samtidigt som förångningen av vatten ger en sänkt reaktionstemperatur vilket ytterligare minskar hastigheterna. Särskilt effektivt blir detta om branden är så stor att mängden syre i utrymmet snabbt blir begränsande för brandutvecklingen. Det kan därför paradoxalt nog vara lättare att släcka en stor brand, som förångar vattnet snabbt och som fortare påverkas av en syrehaltssänkning, än en liten med vattendimma i ett sådant utrymme. Utspädningen av luftens syrehalt är särskilt effektiv vid oljebränder vilket kan bero på reaktionskemin eftersom flyktiga kolväten behöver mer syre (~13 vol-%) än exempelvis trä och glödbränder (~7 vol-%).

Det talas ofta i litteraturen om nyttan av en sänkt syrehalt vid brandsläckning genom tillsatts av en inertgas som till exempel vattenånga. Men det är ju även så att koncentrationen av brännbara ämnen, pyrolysgaser, petroleumgaser med mera, också minskar vid utspädningen, med reducerade reaktionshastigheter som följd. Även för optimering av produktionen gasformigt vatten är det liksom för avkylningsoptimeringen som tidigare nämnts, önskvärt med en vätskefas bestående av små vattendroppar eftersom man vill åstadkomma en snabb förångning.

Mawhinney et al. [3] rapporterar att sänkningen av luftens syrehalt som är den dominerande mekanismen vid släckningen diesel och heptanbränder. Skillnaden är, som man kan förvänta sig, stor, om branden sker under välventilerade förhållanden jämfört med om den sker i slutna utrymmen. Vattenåtgången sägs kunna vara endast en tiondel för det senare fallet jämfört med det förra. Ndubizu et al. [7] hävdar å andra sidan att avkylningseffekterna är de dominerande bidragen vid släckning av en metanflamma.

En effekt av att syrekoncentrationen sänks kan vara att flammen växer i volym eftersom reaktiva molekyler (exempelvis metan) med högt energiinnehåll inte omedelbart träffar på syremolekyler utan hinner transporteras en sträcka (genom konvektion och diffusion) innan reaktion sker. Den ökade flamvolymen underlättar i detta fall nedkylningen av förbränningszonen, bland annat eftersom det ger upphov till större strålningsförluster. Emellertid finns rapporterat [7] att denna volymförändring inträffar när kvävgas används för att sänka syrgashalten men att motsvarande observationer inte gjorts för samma utspädning med vattendimma. Detta kan eventuellt förklaras med att vattendimman mycket effektivt kyler ner omgivande gaslager och därmed kinetiskt hämmar reaktionerna.

Back et al. [8] har beskrivit en modell för att prediktera vattendimmas effektivitet vid släckning av oljebränder i mindre utrymmen, typiskt ett fartygsmaskinrum. Modellen är avsedd att simulera släckning av bränder där själva flamzonen inte direkt nås av vattensprayen utan där släckningen är ett resultat av sänkt syrgashalt och temperatur. Beräknade resultat som jämförts mot experiment har visat god överensstämmelse vad gäller temperaturer, släckningstid och beräkning av kritisk brandstorlek (brand med

minsta nödvändiga effekt för att släckning skall vara möjlig). Om den utvecklade brandeffekten är tillräckligt liten visar modellen på ett jämviktsläge där värmen som branden genererar inte ger vattnet förångningshastighet nog för att rummets partialtryck av syre skall kunna sjunka under nivån som svarar mot en kritisk "släckkoncentration", alltså cirka 14 %. Denna effekt är förstas beroende av graden av ventilation i rummet. I ett helt slutet rum måste det tillförda vattnet så småningom leda till att branden slocknar, även om förångningshastigheten är låg. Ventilationen gör att en del av den vattenhaltiga luften byts ut mot torr luft, och om detta sker med en hastighet som motsvarar ångbildningshastigheten innan för släckningen kritisk syrehalt eller temperatur uppnåts, fortsätter branden att brinna. Tiden för att uppnå en jämvikt, vare sig detta innebär en släckt brand eller ej, beror förutom av brandstorlek och vattendroppstorlek även på rummets volym och graden av ventilation.

### 2.1.4 Absorption av värmestrålning

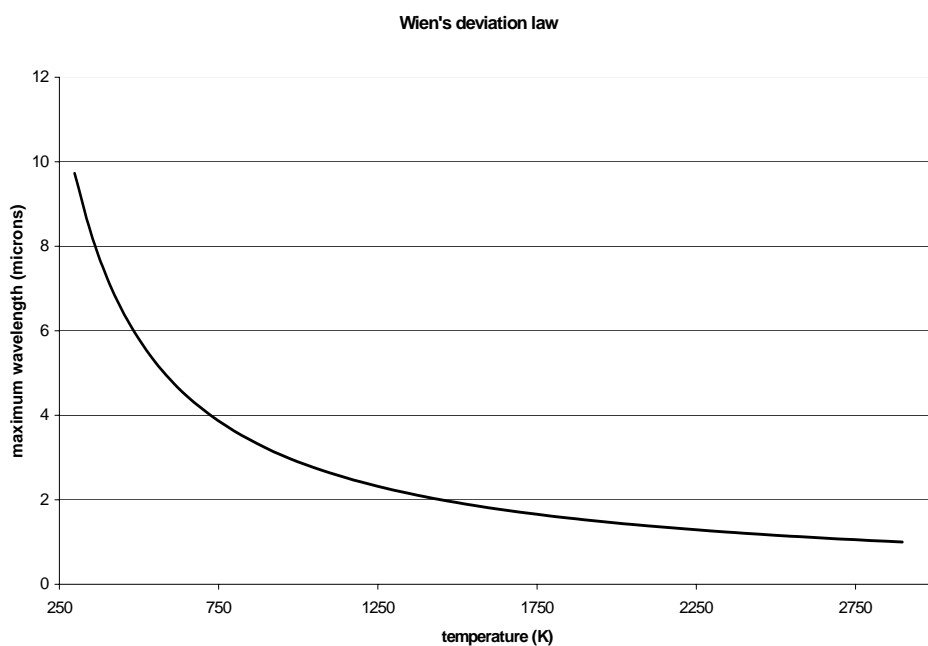
Vatten absorberar värmestrålning och vattendroppar blir effektivare som absorbenter ju fler de är per volymenhet, enligt Lambert-Beer's lag,

$$I/I_0 = \exp(-\kappa_s M_s L)$$

där  $I$ ,  $I_0$  definierar strålningsintensitet, respektive referens intensitet;  $\kappa_s$  = specifik absorptionskoefficient,  $M_s$  = partikel (dropp-) koncentration och  $L$  = strållängd genom gas/dropp-blandningen. Koefficienten  $\kappa_s$  beror bl.a. av droppstorlek och talet ökar då droppdiametern närmar sig strålningens våglängd  $\Leftrightarrow$ . Strålningsvåglängden är fördelad kring ett intensitetsmaximum, med våglängden  $\lambda_{\max}$ , vilken är omvänt proportionell mot temperaturen hos det emitterande objektet i enlighet med Wiens förskjutningslag:

$$\lambda_{\max} = C/T \text{ (m); } C = 2.898 \times 10^{-3} \text{ K}$$

Vid rumstemperatur ligger  $\lambda_{\max}$  vid ca 10  $\mu\text{m}$ , se nedanstående figur och vid 6000°C är värdet  $\sim 0,5 \mu\text{m}$ . Vid den senare temperaturen ligger en del av de emitterade våglängderna inom det synliga området, vilket ger upphov till en färg (vit) hos objektet.



*Figur 3 Strålningsvåglängd med maximal intensitet som funktion av temperaturen.*

För att en vattendroppe skall uppnå maximal effekt vad gäller absorption av värme-strålning vid en brand så skall alltså droppdiametern enligt figur 3 vara i storleksordningen  $\sim 1 - 5 \mu\text{m}$ . Det är idag knappast tekniskt och/eller ekonomiskt möjligt att tillföra vattendroppar med en sådan diameter och kanske heller inte önskvärt med tanke på andra krav på egenskaper hos vattensprayen.

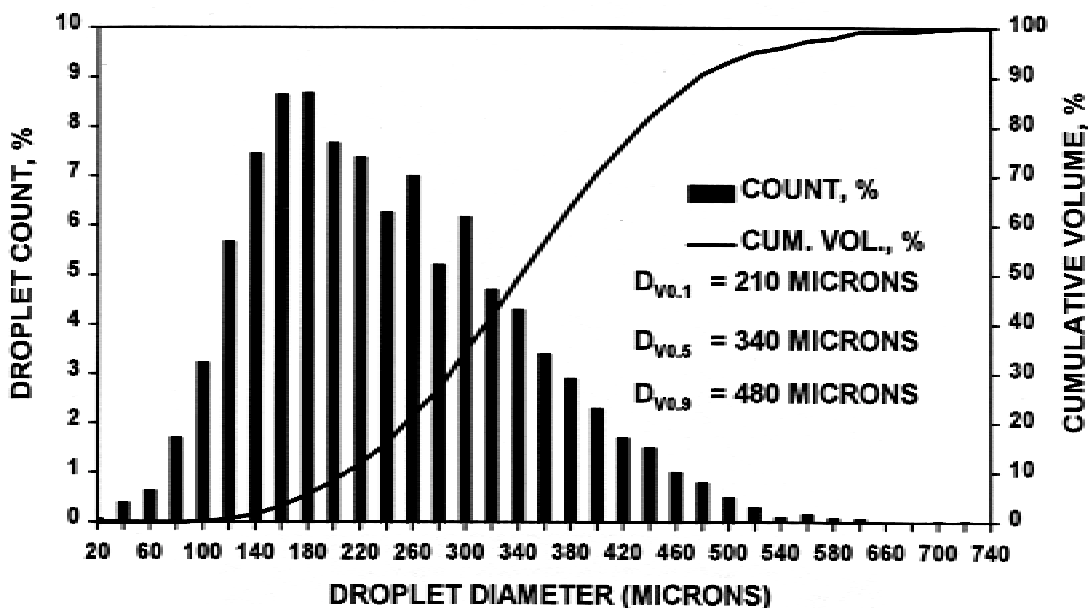
Det finns teoretiska beräkningar [9] som visar att vattendimma bestående av droppar med en diameter av  $10 \mu\text{m}$ , endast behöver en tiondel av vattenmängden för att åstadkomma motsvarande strålningsdämpning som för  $100 \mu\text{m}$  droppar. Experimentella data [9] visar också att över 60 - 70% av värmestrålningen vid en brand kan absorberas av en korrekt applicerad vattendimma.

## 2.2 Definitioner av vattendroppstorlek

Som framgår av ovanstående text finns ett antal olika kriterier och önskemål, vilka ibland kan vara av motstridig natur, vad gäller vilka droppstorlekar som man bör använda sig av vid brandsläckning. Betydelsefullt är förstås också vilken rörelsemängd och riktning som dropparna har.

Droppar som genereras i en spray utmärks av att de varierar i storlek. Denna variation, som kan omfatta flera storleksordningar, kan karakteriseras med hjälp av någon lämplig fördelningsfunktion. När sådana fördelningsfunktioner visas, utnyttjas ofta en kumulativ graf som beskriver vätskevolymen som funktion av droppstorlek, vilket ibland kan vara lite missvisande då volymen vatten i en spray, generellt sett, alltid domineras av fraktionen med de största droppdiametrarna. Volymen av en droppe är proportionell mot kuben av diametern ( $V \propto D^3$ ) vilket exempelvis gör att en  $100 \mu\text{m}$  droppe innehåller 1000 ggr mer vatten än en droppe med diametern  $10 \mu\text{m}$ .

Ett annat och mer detaljerat sätt att karakterisera en spray på, är att visa hur mängden droppar fördelar sig på olika droppstorlekar. Fördelen med att ge denna droppfördelningsfunktion är också att andra karakteristiska mått (se nedan) och funktionstyper lättare kan tas fram ur ett sådant diagram än ur det kumulativa diagrammet. I figuren nedan [10] visas ett exempel på hur båda dessa nämnda funktionstyper kan se ut. I diagrammet visas också ett vanligt använt kumulativt mått för att karakterisera en spray,  $D_{v0,x} = y$ , där  $x$  är ett tal mellan 0 och 1, som uttrycker volymsandelen vatten i sprayen med en droppstorlek som är mindre än  $y$ . Droppfördelningen ger jämfört med den integrerade, kumulativa funktionen, en mer detaljerad bild med en högre upplösning för de mindre droppstorlekarna vilket kan vara av intresse. En ökning av andelen mindre vattendroppar i diagrammet med några procent skulle knappast påverka den kumulativa volymsfördelningen särskilt mycket men kan, som tidigare nämnts, ha betydelse på hur sprayen kommer att uppföra sig vid en brand.



Figur 4 Exempel på droppstorleksfördelning uppmätt på ett kommersiellt munstycke.

En droppstorleksfördelning så som den ges i figuren ovan, kan ofta med fördel definieras genom någon lämplig fördelningsfunktion parametriserad med hjälp av en medeldiameter, spridningen kring denna (variansen) samt antalet droppar/volymenhet. Exempelvis kan ibland en droppfördelning  $f_N(D)$  beskrivas av en Gaussisk funktion ("normalfördelning"):

$$f_N = A_N \exp\left(-\frac{D - D_A}{\sigma^2}\right)$$

där  $D_A$  är det aritmetiska medelvärdet för droppen,  $\sigma^2$  är variansen kring medelvärdet och  $A_N$  normerar ekvationen så att integralen av  $f_N(D)=1$ . Själva fördelningsfunktionen är definierad genom:

$$f_N = \frac{dN}{dD} N_0$$

där derivatan i högerledet ( $dN/dD$ ) ger variationen i antalet droppar ( $N$ ) som funktion av diametern ( $D$ ) och  $N_0$  är det totala antalet droppar/volymenhet.

Ett annat exempel på använda fördelningsfunktioner är log-normalfördelningen:

$$f_N = \frac{1}{D} \exp\left(-\frac{(\ln D - \ln D_M)^2}{\sigma_{dl}^2}\right)$$

där  $D_M$  är mediandiameter och  $\sigma_{dl} = \ln(D_M/Q)$  där  $Q$  erhålls ur den övre integrationsgränsen för uttrycket:

$$0.843 \int_0^Q f_N dD$$

Ett tredje vanligt sätt att karakterisera droppstorleksfördelningen är genom en så kallad Rosin-Rammler distribution:



$$f_N \propto \exp\left(-\alpha \frac{D^\beta}{\beta}\right)$$

där  $\alpha$ ,  $\beta$  är konstanter. Integration av Rosin-Rammler ger den enkla kumulativa distributionen:

$$F(D_s) = \int_0^{D_s} f_N(D) dD \propto 1 - \exp\left(-\alpha \frac{D_s^\beta}{\beta}\right)$$

där  $D_s$  är någon önskad droppdiameter.

Ofta nöjer man sig med att definiera en medeldiameter för sprayen. Sättet att definiera medeldroppstorleken i en spray varierar och beror lite av vilka egenskaper man vill beskriva. Uttrycken för att definiera medelvärdet kan skrivas på den generella formen [11]:

$$D_{mn} = \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^m f_N(D) dD}{\int_{D_0}^{D_m} D^n f_N(D) dD}$$

där  $D_{mn}$  är medeldiameter, index  $mn$  definierar typen av medelvärdesbildning och  $(m+n)$  kallas medelvärdets ordning. Gränserna för integralen har angetts till minsta ( $D_0$ ) och största ( $D_m$ ) droppstorlek. Olika medeldiametrar uttrycker olika fysikaliska egenskaper hos sprayen. Exempel på medeldiametrar är:

$$D_{10} = \frac{\int_{D_0}^{D_m} D f_N(D) dD}{\int_{D_0}^{D_m} f_N(D) dD} \quad \text{■ längd medeldiameter; ordning 1}$$

$$D_{20} = \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^2 f_N(D) dD}{\int_{D_0}^{D_m} f_N(D) dD} \quad \text{■ yt medeldiameter; ordning 2}$$

$$D_{30} = \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^3 f_N(D) dD}{\int_{D_0}^{D_m} f_N(D) dD} \quad \text{■ volyms, eller mass medeldiameter; ordning 3}$$

$$D_{31} = \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^3 f_N(D) dD}{\int_{D_0}^{D_m} D f_N(D) dD} \quad \text{■ volyms längd medeldiameter; ordning 4}$$

$$D_{32} = \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^3 f_N(D) dD}{\int_{D_0}^{D_m} D^2 f_N(D) dD} \quad \text{■ volym ytmedeldiameter ■ Sauter' medeldiameter; ordning 5}$$

$$D_{43} = \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^4 f_N(D) dD}{\int_{D_0}^{D_m} D^3 f_N(D) dD} \quad \text{■ Herdan' medeldiameter; ordning 7}$$

Olika medeldiametrar anges i litteraturen och det kan ibland verka lite förvirrande. Exempelvis kallas  $D_{V0.5}$ , se ovanstående figur, volyms (VMD) eller mass (MMD) medel diameter, vilket dock baseras på den kumulativa distributionen och inte skall förväxlas med  $D_{30}$ .

En av de vanligast förekommande diametermåtten är  $D_{32}$ , Sauter (SMD) en medeldiameter, vilken relaterar droppens yta till volymen av droppar så att måttet  $D_{32}$  ger den diameter dropparna i en monodispers spray (det vill säga en spray med samma diameter på alla droppar) skulle ha där samma volyms/area-förhållande gällde. Detta har betydelse särskilt då det är dropparnas area som är det intressanta vilket ofta är fallet för kemiskt reagerande system. Vid användning av en vattendimma kan därför detta mått vara användbart då man vill uppskatta avdunstningshastighet hos dropparna eftersom ju denna bland annat beror på den total ytarean hos vattensprayen. Emellertid kommer inte SMD att ge korrekta terminalhastigheter för dropparna (jfr avsnitt 2.1.2), vilket ger upphov till felaktiga värmeöverföringstal, varför användandet av SMD för att skatta avdunstning mera noggrant kan kräva lite mera detaljer kring droppstorleksfördelningen. För att bestämma vattendimmans värmestrålnings-absorberande egenskaper är kanske  $D_{10}$  eller  $D_{20}$  mera adekvat än SMD.

Olika författare har angett olika optimala droppstorlekar för brandsläckning. Det är uppenbart så att valet av droppstorlek beror av typ av brand, bränsle, om branden sker i det fria eller inomhus, etc. Liu och Kim [9] har sammanställt erfarenheter från studier som gjorts under åren av olika forskargrupper för att undersöka vilka droppstorlekar som är optimala vid brandsläckning, se nedanstående tabell.

Tabell 1 Optimala vattendroppstorlekar för brandsläckning enligt olika studier.

År	Droppstorlek (←m)	Kommentar
1955	100-150	Horisontellt applicerad
	150-300	Låg flampunkt
	300-350	Vertikalt applicerad
1960	350	
1970	<350	Nedkylning av gaslager
	4000-5000	Penetration av brandplym
1976	310	Förhindra gasexplosion
1977	>1000	Penetration och ytvätning vid bränder >250 kW
1979	200-300	Kylning av gaslager och flamma
1985	400	Hög flampunkt
1986	300-900	Optimum beror av gaslagrets temperatur
1988	250-300	Manuellt hållen spray
1989	300	Manuellt hållen spray
1991	60	Tryck-spray

## 2.3 Användning av additiver

Även om vatten i sig har utmärkta fysikaliska egenskaper för brandsläckning vill man ibland förbättra släckförmågan med någon form av additiv.

Referens [12] redovisar försök i fartygsmaskinrum där 2,5 mass-% natriumklorid (NaCl) löstes i vatten för att efterlikna havsvatten. Resultaten visar förbättrad effektivitet eftersom 40 – 50 % kortare släcktider erhöles och att släckning var möjlig vid lägre vattentätheter jämfört med sötvatten. Som brandkälla användes dieselpoolbränder. Dessutom påverkades inte resultaten i samma utsträckning av olika obstruktioner. En möjlig förklaring till de förbättrade resultaten är att NaCl (som är ett alkaliskt) kristalliserar i flammen när de små vattendropparna förångas.

Maskinrumsförsök i ett 500 m<sup>3</sup> maskinrum [13] vid SP Brandteknik har visat att havsvatten reducerar tiden till släckning jämfört med dricksvatten. Andra försök [14, 15] vid SP visar att olika organiska salter markant förbättrar släckförmågan hos vatten, både mot olika poolbränder och mot fibrös brand.

U.S. Army har studerat ett antal additiver för användning för att förbättra vattens släckeffektivitet [16]. Försöken genomfördes i småskala och som brandkälla användes en liten, 14 cm i diameter, balja med JP-8 som är det motorbränsle som används inom armén. JP-8 har en flampunkt omkring 50°C alltså över rumstemperatur. Vatten med olika typer av additiver sprayades mot branden med en mekanisk färgspruta och tiden till släckning noterades. Försöken gjordes vid tre olika temperaturer, 5°C, 22 °C och 77°C. Tolv olika additiver provades.

Bäst av de additiver som provades var 60 % kaliumlaktat följt av 60 % kaliumacetat och 10 % natriumbromid. De två förstnämnda släckte branden på i genomsnitt cirka 3 sekunder. Vatten utan additiv krävde cirka 30 sekunders påföring innan släckning.

## 2.4 Hälsoaspekter

Hälsoaspekter vid användning av sprinkler har aldrig betraktats som något problem, varför skulle det då vara det för vattendimma? Den huvudsakligen anledningen till att personsäkerheten har ifrågasatts är att vattendropparna är betydligt mindre och att de därmed kan följa med inandningsluften ned i lungorna.

Environmental Protection Agency (EPA) är en amerikansk myndighet som bland annat har till uppgift att utvärdera samtliga släcksystem som används som alternativ till halon på den amerikanska marknaden. Vid arbetet med NFPA 750 ville EPA att hälsoaspekterna med vattendimma genomlystes varför en expertpanel bildades för att behandla dessa frågor. De frågor som man ville studera [17, 18] var:

- Risken för ”drunkning” på grund av att vatten når ned i lungorna.
- Reduktion av syrgasinnehåll i inandningsluft.
- Inverkan av mikrobiologisk tillväxt i vatten.
- Inverkan av tillsatsmedel till vattnet.
- Inverkan av brandprodukter som löses i vattnet.
- Systemens påverkan på sikt och därmed utrymningsmöjlighet.

### 2.4.1 Riskerna med att inhalera rent vatten

Mycket små partiklar fastnar inte i luftvägarna utan kan följa med inandningsluften ned i lungorna. Fenomenet är bevisat för partiklar med diameter mindre än 10  $\mu\text{m}$ , enligt vissa experter ända upp till 20  $\mu\text{m}$ .

Man kan dra paralleller till befuktningssystem. I länder med varmt klimat och låg luftfuktighet är det vanligt att inomhustemperaturen sänks genom befuktning. I dessa fall används droppstorlekar just i storleksordningen mindre än 20  $\mu\text{m}$ . Befuktningssystem används även inom lantbrukets djurhållning för att reducera luftens partikelinnehåll och för att öka luftfuktigheten. Det har inte rapporterats några negativa hälsoeffekter på grund av inandning av rent vatten från befuktningssystem.

Ett beräkningsexempel för att åskådliggöra hur mycket vatten som kan inhaleras från ett system som använder vattendimma kan göras. Droppstorleksmätningar visar att ett munstycke som producerar ovanligt stor andel små vattendroppar och som dimensioneras för 0,024 g vatten per liter luft och sekund. En person som utför lätt arbete antas omsätta 25 L luft per minut. Det medför att maximalt 3 g vatten kan inhaleras under en tidsperiod om fem minuter. Försök visar att maximalt omkring 50 % av partiklarna som är 5  $\mu\text{m}$  når ned till lungorna, förutsatt att man andas genom munnen. Inandning genom näsan minskar andelen vatten som når lungorna till omkring 20 %. För större partiklar sjunker ovanstående värden ytterligare, vilket innebär att mycket små vattenmängder når lungorna. Dessutom torde fem minuter vara att betrakta som en ganska lång tidsperiod i dessa sammanhang, utrymning bör normalt gå snabbare än så.

Personer med astma kan få besvär om de utsätts för vattendimma. Men detta torde dock tillhöra en av de vardagliga situationer som en astmatiker kan få besvär av. Personer med emfysem och liknande åkommor påverkas inte nämnvärt mer av vattendimma än fullt friska personer.

Reduktion av syrgashalten i luften av vattendimma är att betrakta som så marginell att det överhuvudtaget inte påverkar människor. Syrgashalten i luft mättad med vattenånga vid

50°C ligger strax över 19 % och den eventuella ytterligare volym som vattendropparna upptar är bråkdelar av en procent.

### 2.4.2 Tillsatser till vattnet

EPA har antagit en policy som tillåter tillsatser till vatten om det skyddade utrymmet kan utrymmas inom 30 sekunder. I annat fall måste additivets inverkan på människor utvärderas från fall till fall. Någon motsvarande reglering finns inte i Europa, och det är även osäkert på vilket sätt olika tillsatser skulle kunna godkännas. Svenska myndigheter kommer med största sannolikhet inte att vilja uttala sig, vilket innebär att det blir upp till varje användare att själv bedöma vilka tillsatser och koncentrationer som kan accepteras. Man kan tänka sig att flera olika ämnen kan blandas till vattnet i ett system med vattendimma:

- Korrosionsinhibitorer.
- Bakteriehämmande medel.
- Frysskyddsmedel.
- Ytaktiva ämnens såsom skumvätskor.
- Olika salter för att förbättra släckegenskaperna.

Det bör vara möjligt att undvika behovet av korrosionsinhibitorer genom ”rätt” materialval.

I traditionella sprinklersystem har man lång erfarenhet av stillastående vatten i rörsystem. Bakteriell tillväxt eller mikrobiologisk aktivitet har erfarenhetsmässigt inte varit något problem, varför behovet av bakteriehämmande medel i system med vattendimma inte torde vara aktuellt.

Frysskyddsmedel används när det finns en risk att vatten i ett system kan frysa. I traditionella sprinklersystem har det varit vanligt med propylenglykol men även andra ämnen såsom kalciumklorid och glycerin. På senare år har man uppmärksammat att vissa frysskyddsmedel tillför energi [19] till en brand varför andra alternativ är under utveckling [20]. Vid val av frysskyddsmedel bör man även ta hänsyn till miljöpåverkan.

Många tillverkare har undersökt möjligheten att använda tillsatser som ökar vattnets släckeffektivitet. Det kan vara ytaktiva ämnen, typiskt skumvätskor, eller olika salter. Användningen av skumtillsatser i sprinklersystem har inte visat på några negativa hälsoeffekter, men som även sagts om andra tillsatser så bör en bedömning göras från fall till fall. Tilläggas kan också att salter och ytaktiva ämnen gör att vattendroppstorleken ökar.

### 2.4.3 Inverkan av brandprodukter som löses i vattnet

En brand producerar många olika toxiska föreningar. Några av de akut farligaste ämnena såsom CO, CO<sub>2</sub> och HCN är inte vattenlösliga i någon större grad och de två förstnämnda kan passera de flesta typer av filter som används i andningsskydd. HCl däremot, saltsyra som produceras när till exempel PVC brinner löser sig i vatten och kan vara irriterande för luftvägar och slemhinnor.

Mindre sotpartiklar i brandrök är normalt i storleksordningen någon mikrometer, vilket innebär att de kan följa med inandningsluften ned i lungorna. Man vet att många av de skadliga ämnena som produceras vid en brand fastnar på sotpartiklarna.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att vattendimma inte bidrar till ökad risk att man får i sig skadliga ämnen från branden. Däremot kan man säga att brandrök som mestadels ansamlas i ett rums övre delar kommer att fördela sig i hela rummet eftersom vattensprayen trycker ned brandröken mot golvnivå. Denna effekt reducerar sikten varför det kan finnas anledning att ha ett förlarm så att personer hinner utrymma innan aktivering.

## 3 Installationsregler och provningsmetoder

### 3.1 International Maritime Organisation (IMO)

IMO är det internationella organ under FN som ansvarar för sjöfart. Under årens lopp har de utvecklat och instiftat mer än 30 konventioner och mer än 700 regelverk och rekommendationer. En av dessa är SOLAS-konventionen (International Convention for the Safety of Life at Sea) som är IMOs regelverk med krav på fartygs konstruktion och utrustning. I SOLAS kapitel II-2 återfinns krav och installationsregler för byggnadstekniskt brandskydd, detektion av brand och släcksystem.

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. Dessa regler finns samlade i Resolution A.800(19), se referens [21]. I nedanstående tabell sammanfattas innehållet.

Tabell 2 Sammanfattning av innehållet i IMO Resolution A.800(19).

IMO Resolution A.800(19)	
Installationskrav (översikt)	Provningsmetoder
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatisk aktivering (termisk)</li> <li>• ”Fast response” karakteristik på munstycken</li> <li>• Minst 280 m<sup>2</sup> verkningsyta</li> <li>• 30 minuters varaktighet</li> <li>• Våtrörsystem (mindre delar torrör)</li> <li>• Två oberoende pumpar</li> <li>• Två oberoende kraftkällor</li> </ul>	<p>Brandprovningmetoden innehåller brandscenarier för:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hytter upp till 12 m<sup>2</sup> med tillhörande korridor</li> <li>• Hytter från 25 m<sup>2</sup> upp till 80 m<sup>2</sup></li> <li>• Publika lokaler (2,5 m och 5 m takhöjd)</li> <li>• Butiks- och lagerlokaler (2,5 m takhöjd)</li> </ul> <p>Komponentprovningmetoden avser endast munstycken som bland annat provas med avseende på:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nominell aktiveringstemperatur</li> <li>• Hydrostatiskt tryck</li> <li>• Tryckstöt</li> <li>• Vibration</li> <li>• Korrosion</li> <li>• Igensättning</li> </ul>

Eftersom kravet är att de alternativa sprinklersystemen skall vara ekvivalenta med de traditionella sprinklersystem som beskrivs i SOLAS kapitel II-2 genomfördes ett stort antal sprinklerförsök [22, 23] när metoden utvecklades. Dessa försök genomfördes vid SP Brandteknik och vid det finska brandlaboratoriet vid VTT.

I och med avvecklingen av halon utvecklade även IMO installationsregler och provningsmetoder för alternativa, vattenbaserade släcksystem för maskinrum och pumprum. Dessa regler finns samlade i MSC/Circ.668 och 728, se referens [24, 25]. I nedanstående tabell sammanfattas innehållet.

Tabell 3 Sammanfattning av innehållet i IMO MSC/Circ.668 och 728.

MSC/Circ.668 och 728	
Installationskrav (översikt)	Provningsmetoder
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manuell aktivering</li> <li>• 30 minuters varaktighet</li> <li>• Grupputlösningssystem (deluge)</li> <li>• Två oberoende pumpar</li> <li>• Två oberoende kraftkällor</li> </ul>	<p>Brandprov skall genomföras i maskinrum med volym om:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 500 m<sup>3</sup> (Class 1)</li> <li>• Mellan 500m<sup>3</sup> och 3000 m<sup>3</sup> (Class 2)</li> <li>• Över 3000 m<sup>3</sup> (Class 3)</li> </ul> <p>Komponentprovningmetoden avser endast munstycken som bland annat provas med avseende på:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Upphettning (800°C i 15 minuter) och därefter snabb avkylning</li> <li>• Mekanisk påverkan</li> <li>• Vibration</li> <li>• Korrosion</li> <li>• Igensättning</li> </ul>

Bränder i maskinrummet är statistiskt sett de mest frekventa bränderna på fartyg. Ofta är det läckage av bränsle, smörjolja eller hydraulolja som antänder mot heta ytor. I moderna fartygsmaskinrum förebygger man sådana bränder bland annat med dubbelmantlade rör, bränslerör ingjutna i motorblocket och genom att isolera heta ytor.

Normalt skyddas maskinrummet med ett gassläcksystem, oftast koldioxid men halon har också varit vanligt. Men eftersom det kan dröja 15 - 20 minuter innan systemet manuellt aktiveras vid en brand blir brandskadorna ändå stora. Därför har IMO infört krav att maskinrummen skall förses med punktskyddssystem över de områden där risken för brand är som störst. Punktskyddssystemet kan aktiveras i ett tidigt skede av ett brandförlopp och därmed reducera brandskadorna.

Kravet skall tillämpas både på nybyggda passagerarfartyg och lastfartyg men även på existerande passagerarfartyg. Systemet skall vara vattenbaserat, alltså vattenspray eller vattendimma och skall utvärderas enligt den provningsmetod som tagits fram. Dessa regler finns samlade i MSC/Circ.913, se referens [26] I nedanstående tabell sammanfattas innehållet.

Tabell 4 Sammanfattning av innehållet i IMO MSC/Circ.913.

MSC/Circ.913	
Installationskrav (översikt)	Provningsmetoder
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manuell aktivering (bemanning maskinrum), manuell och automatisk aktivering (obemanning maskinrum)</li> <li>• 20 minuters varaktighet</li> <li>• Grupputlösningssystem (deluge)</li> </ul>	<p>Brandprov skall genomföras i ett rum utan begränsande ventilation. Två olika spraybränder med dieselolja används:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nominell 1 MW</li> <li>• Nominell 6 MW</li> </ul> <p>Komponentprovningmetoden avser endast munstycken. Kraven är lika de krav som återfinns MSC/Circ. 668 och 728</p>



## 3.2 National Fire Protection Association (NFPA)

NFPA är en oberoende, ideell organisation med mer än 67 000 medlemmar som sedan mer än hundra år arbetar med att minska uppkomsten och konsekvenserna av brand. Som ett led i detta arbete utvecklar och publicerar man rekommendationer inom brandskyddsområdet. Finansieringen sker via försäljning av publikationer, med medlemsavgifter och seminarier. För närvarande omfattar NFPAs rekommendationer tolv volymer och över 285 olika dokument. Mest känd av NFPAs rekommendationer är troligen NFPA 13, som är den allra äldsta, publicerad i sin första utgåva 1896. NFPA 13 beskriver detaljerat dimensionering och installation av sprinklersystem i framförallt industriella byggnader. De flesta av NFPAs rekommendationer är godkända av American National Standards Institute (ANSI). Det är vanligt att dokumenten refererar till standarder från Underwriters Laboratories och Factory Mutual Research Corporation.

Det är i sammanhanget viktigt att erinra att NFPA som organisation varken godkänner eller inspekterar några produkter eller installationer. Detta ansvar åligger varje berörd myndighet eller godkännandeorgan.

År 1993 påbörjade NFPA arbetet med en rekommendation för vattendimma som fick namnet NFPA 750. Den första utgåvan publicerades 1996, den andra 2000. Dokumentet innehåller minsta krav 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.

Den första utgåvan av NFPA 750 definierar vattendimma som en vattenspray där 99% av det kumulativa volymsflödet utgörs av vattendroppar mindre än 1000  $\mu\text{m}$  (1 mm). I den andra utgåvan finns beskrivet hur och var i vattensprayen 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.

## 3.3 Underwriters Laboratories (UL)

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

Den första utgåvan av UL 2167 [27] innehåller provningsmetoder för munstycken. Stora delar av dokumentet är baserat på IMO Resolution A.800(19) och MSC/Circ.668 och 728 och därför är brandscenarierna, acceptanskriterierna och komponentproven mer eller mindre identiska. Andra delar av dokumentet bygger vidare på tidigare UL standarder för sprinkler och bostadssprinkler. I nedanstående tabell sammanfattas innehållet.

Tabell 5 Sammanfattning av innehållet i UL 2167.

UL 2167	
Installationskrav	Provningsmetoder
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brandförsöken genomförs i enlighet med tillverkarens installationsmanual och försöken visar om tillverkarens riktlinjer är tillfyllest.</li> <li>• Övrig systemutformning i enlighet med NFPA 750.</li> </ul>	<p>Brandprovningssmetoden innehåller brandscenarier för:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bostäder (residential)</li> <li>• Låg riskklass</li> <li>• Normal riskklass, grupp 1</li> <li>• Normal riskklass, grupp 2</li> <li>• Fartygshytter upp till 12 m<sup>2</sup> med tillhörande korridor</li> <li>• Fartygshytter från 25 m<sup>2</sup> upp till 50 m<sup>2</sup></li> <li>• Publika lokaler på fartyg (2,5 m och 5 m takhöjd)</li> </ul> <p>Komponentprovningssmetoden avser endast munstycken som bland annat provas med avseende på:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nominell aktiveringstemperatur</li> <li>• Hydrostatiskt tryck</li> <li>• Tryckstötar</li> <li>• Vibration</li> <li>• Korrosion</li> <li>• Igensättning</li> </ul>

Not. Det kan vara värt att notera att definitionen för Låg och Normal riskklass i USA (av NFPA, UL och FMRC) inte är identisk med den som används i Europa (av CEN och CEA).

### 3.4 Factory Mutual Research Corporation (FMRC)

FM Global är en sammanslagning av tre stora amerikanska försäkringsbolag. Inom organisationen finns Factory Mutual Research Corporation (FMRC) som jobbar med standardisering, forskning och certifiering. FMRC har tagit fram installationsregler och provningsmetoder för gasturbiner, maskinrum, låg riskklass och för renrum inom mikrochipindustrin. Se nedanstående tabell.

Tabell 6 Sammanfattning av installationskrav och provningsmetoder publicerade av Factory Mutual Research Corporation.

FMRC	
Installationskrav	Provningsmetoder
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatisk:               <ol style="list-style-type: none"> <li>a) avstängning av bränsle,</li> <li>b) stängning av dörrar,</li> <li>c) stopp av ventilation,</li> <li>d) stopp av elektriska system.</li> </ol> </li> <li>• Varaktigheten skall vara maximal släckningstid i brandförsök multiplicerat med 2, dock minst 10 minuters varaktighet</li> <li>• Värmedetektorer skall klara att detektera och aktivera systemet inom 60 sekunder</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gasturbiner, maskinrum och maskinrum med hög risk (bensindrivna) med en volym om maximalt 80 m<sup>3</sup></li> <li>• Enligt ovan men maximalt 260 m<sup>3</sup></li> <li>• Enligt ovan men större än 260 m<sup>3</sup></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatisk aktivering (termisk)</li> <li>• ”Fast response” karakteristik på munstycken</li> <li>• Verkningsyta = 9 munstycken</li> <li>• 60 minuters varaktighet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Låg riskklass (2,4 m - 5 m takhöjd)</li> </ul> <p>Metoden är till stora delar baserad på IMO Resolution A.800(19)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatisk aktivering med detektionssystem som är godkänt för ändamålet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utrustning i renrum (wet benches)</li> </ul>

Dessutom har FMRC också utvecklat en provningsmetod [28] för den typ av industriella fritöser som används inom livsmedelsindustrin. Kravet är att de system som provas skall klara att släcka en brand utan att frityrolja stänker upp och att kyla oljan till en temperatur under 200°C, för att förhindra återantändning.

### 3.5 Comité Européen de Normalisation (CEN)

Inom Europa jobbar för närvarande en arbetsgrupp under CEN/TC191/WG5 med att ta fram installationsanvisningar och brandprovningmetoder för fasta system på ”land”. Arbetet inleddes 1998 och målsättningen är att installationsanvisningarna skall vara funktionsbaserade.

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.

### 3.6 Australian Standard AS 4587 - 1999

Standards Australia publicerade under 1999 en Australisk standard för installation av fasta system med vattendimma [29]. Standarden är skriven av kommittén FP/12, Aqueous Fire Protection Systems, där ett antal statliga myndigheter, den nationella brandförsvarsföreningen, vissa branschorganisationer och den nationella avdelningen under Society of Fire Protection Engineers (SFPE) är representerade.

Standarden definierar vattendimma som en vattenspray där 99 % av det kumulativa volymsflödet utgörs av vattendroppar mindre än 1000 µm (1 mm), alltså helt identiskt med definitionen i den första utgåvan av NFPA 750.

Dokumentet innehåller minsta krav på bland annat installation, dokumentation, aktivering, märkning och hydraulisk dimensionering av system. Däremot innehåller det inte skyddsmål eller specifika anvisningar för hur ett visst system skall utföras för att kontrollera, dämpa eller släcka en brand. Dokumentet innehåller heller inga anvisningar vad gäller underhåll av system, detta finns generellt beskrivet för släcksystem i andra standarder.

## 4 Marknadsöversikt – olika aktörer på marknaden

### 4.1 Tillverkare av system och exempel på systemkomponenter

Det finns ett stort antal företag på marknaden som tillverkar system och ett flertal av företagen har anknytning till de nordiska länderna. I nedanstående tabell, som inte gör anspråk på att vara komplett, listas några av tillverkarna.

Tabell 7 Några av de företag som marknadsför system med vattendimma.

Produktnamn	Företag	Land	Hemsida
AquaMist	Grinnell Corporation	USA	www.grinnellfire.com
AQUASYS	AQUASYS	Österrike	-
Aquatec	LPG Fire Fighting Technology & Engineering	Spanien	www.lpg.es
Fire-Scope 2000	Securiplex	Kanada	www.securiplex.com
FlexiFOG	Heien-Larssen	Norge	www.heien-larssen.com
Fogmaker	Fogmaker International AB	Sverige	www.fogmaker.se
FOGTEC	FOGTEC Brandschutz GmbH & Co. KG	Tyskland	www.fogtec.com
Hi-Fog	Marioff Corporation Oy	Finland	www.hi-fog.com
LoFlow	GW Sprinkler A/S	Danmark	www.gwsprinkler.com
MicroDrop	Total Walther	Tyskland	www.totalwalther.com
Micromist	Fike Protection Systems	USA	www.fike.com
MysterySpray	Angus	England	www.angusfire.co.uk
Mistex	Tamar Designs Pty ltd	Australien	www.tamar.com
Minifog, etc	Minimax GmbH	Tyskland	www.minimax.com
SEM SAFE	SEMCO A/S	Danmark	www.semco.dk
SoftEx	Softonex Oy Ltd	Finland	www.softonex.com
Ultra Fog	Ultra Fog AB	Sverige	www.ultrafog.com

Nedanstående två bilder visar munstycken från några olika tillverkare. I den första bilden visas fem olika munstycken som installeras i hytter, korridorer och publika utrymmen ombord på fartyg eller i låg- och normal riskklass i landapplikationer. Samtliga munstycken är försedda med en glasbulb med en nominell aktiveringstemperatur på 57°C och är av typen ”fast response”.



Figur 5 Fem olika automatiska munstycken, som alltså aktiveras av värmen från en brand. Följande fabrikat, sett från vänster visas; Marioff Hi-Fog, Marioff Hi-Fog 2000, Fogtec, Ultra Fog och Grinnell AquaMist AM6.

I den andra bilden visas fyra olika öppna munstycken avsedda till exempel för skydd av fartygsmaskinrum. Normalt är maskinrummen försedda med brandlarm, men systemen aktiveras inte automatiskt, utan manuellt av fartygets personal. Samtliga munstycken som visas är utförda i rostfritt stål för att klara krav på hög korrosionsbeständighet och för att motstå höga temperaturer vid brand.



*Figur 6 Fyra olika öppna munstycken, följande fabrikat, sett från vänster visas; Fogtec, Marioff Hi-Fog, Ultra Fog och Grinnell AquaMist AM10.*

I nedanstående bilder visas två olika typer av vattenförsörjning. Den vänstra bilden visar en "traditionell" lösning där ett antal högtryckspumpar med tillhörande styr/övervakningsskåp monterats i en stålram. Pumparna är av displacementstyp (kolvpumpar). Till varje elmotor kan kopplas 1 - 3 pumpar. Pumparna startar en efter en beroende på systemets vattenbehov som i sin tur är beroende av hur många munstycken som aktiveras vid en brand. Typiskt arbetstryck är mellan 80 och 140 bar. Systemets tillförlitlighet är hög då varje elmotor och pump drivs individuellt och inte är beroende av varandra.

Den högra bilden visar en "gasdriven pump" (GPU). Gaspumpen är helt självförsörjande och behöver inte anslutas yttre el eller vattenförsörjning. Pumpens huvuddelar som samtliga är monterade på ett stålstativ, består av en gasdriven kolvpump, vattencylindrar och drivgascylindrar med tillhörande utlösningssystem. Systemet drivs av trycket från den anslutna drivgasen. Drivgasen är antingen nitrogen (kvävgas) eller luft som lagras under 200 bars tryck i 50 liters tryckcylindrar. Vatten lagras normalt i tillhörande vattencylindrar eller separat tank, men systemet kan även anslutas till en yttre vattenkälla. Antal drivgascylindrar bestäms av vald varaktighet och vattenvolymen bestäms av vattenbehovet som sin tur bestäms av hur många munstycken som aktiveras vid en brand. Systemets varaktighet är normalt till 30 eller 60 minuter och ett typiskt arbetstryck 80 - 120 bar.

Gaspumpen startas automatiskt av ett tryckfall i det yttre rörsystemet men kan även startas manuellt. När systemet aktiveras öppnar ett visst förutbestämt antal utlösningssystem, monterade på drivgascylindrarna. Drivgas strömmar ut och startar den långsagliga kolvpumpen som i sin tur trycker ut en blandning av drivgas och vatten i rörsystemet. Kolvpumpens slaghastighet regleras automatiskt i förhållande till i varje ögonblick erforderligt vattenbehov. När vatten och drivgasblandningen strömmar ut genom ett av munstyckena expanderar den komprimerade drivgasen och bidrar till att mycket finfördelade vattendroppar bildas. Gaspumpen är att betrakta som mycket driftsäker då den är helt självförsörjande och inte kräver någon anslutning till yttre kraft eller vattenförsörjning.



Figur 7 Två olika typer av vattenförsörjningar, till vänster en "traditionell" lösning där ett antal högtryckspumpar av displacementstyp drivs av var sin elmotor och till höger en "gasdriven" pump.

## 4.2 Möjligheter till ytterligare kunskapsinhämtning inom området

### 4.2.1 International Water Mist Association (IWMA)

Branschorganisationen International Water Mist Association (IWMA) bildades i april 1998 och har målsättningen att fungera som ett forum för samarbete mellan tillverkare, företag, forskare och andra intressenter som på ett eller annat vis arbetar med "vattendimma". Förutom ren marknadsföring har man även för avsikt att uppmuntra framtagandet av installationsrekommendationer, initiera arbetsgrupper, bidra till kunskapsöverföring genom att anordna seminarier och demonstrationer, etc.

Man har en hemsida på adressen [www.iwma.net](http://www.iwma.net) där man med jämna mellanrum lägger ut ett nyhetsblad och sammanställer relevant litteratur inom området. Dessutom arrangerar man en årlig internationell konferens, den första våren 2001.

### 4.2.2 Halon Options Technical Working Conference

En gång per år, vanligen under våren, anordnar The Center for Global Environmental Technologies (CGET) vid New Mexico Engineering Research Institute och The University of New Mexico en tredagars konferens i staden Albuquerque i New Mexico, USA. Konferensens inriktning har under de dryga tio år som den arrangerats varit mot alternativ till halon och varje år finns minst ett programblock som behandlar vattendimma. Mer information och formulär för att beställa dokumentation från tidigare år kan hämtas från hemsidan på adressen <http://nmeri.unm.edu/cget/confinfo.htm>.

### 4.2.3 Det Norske Veritas (DNV)

Det Norske Veritas (DNV) är ett av de klassningssällskap som certifierar utrustning inom sjöfartsområdet. DNV är en oberoende stiftelse med klassificering inom sjöfarts-och offshore som främsta aktivitet.

På hemsidan, med adressen [www.dnv.com](http://www.dnv.com) lägger man ut certifikat på de system som man typgodkänt, certifikaten är grupperade under följande tre kategorier.

- Equivalent Sprinkler Systems (IMO Res A.800 (19))
- Fixed Local Application Water Based Systems (SOLAS Ch. II-2, Reg 7.7)
- Waterbased Fixed Fire Fighting System (IMO Circ. 668/728)

I tillägg till certifieringen av system besiktigar och godkänner DNV systemet vid själva installationen samt genomför inspektioner av system vart eller vartannat år på seglande fartyg.



## 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, de skyddsmål som man ställer upp, de förutsättningar som råder, bland annat vad gäller tillgängligt vattentryck, tillgång på vatten, kostnadskrav, etc.

### 5.1 Fartygsmaskinrum och gasturbiner

Fartygsmaskinrum och gasturbiner är förmodligen den typ av applikation där vattendimma tillämpats allra mest. En bidragande orsak är naturligtvis att Halon 1301 varit ett vanligt förekommande släckmedel just där.

I detta kapitel redovisas erfarenheter från flera olika program där möjligheterna att använda vattendimma har studerats mycket systematiskt.

#### 5.1.1 Fartygsmaskinrum

##### 5.1.1.1 Forskning och utveckling vid US Navy

Under senaste 20 åren har US Navy [30, 31] genomfört omfattande studier rörande användningen av vattendimma i olika tillämpningar ombord på sina fartyg. Man har totalt 274 fartyg med inalles 2549 släcksystem med totalt cirka 880 ton Halon 1301.

Under slutet av 1970-talet genomförde man teoretiska beräkningar som visade att små vattendroppar kunde släcka bränder tack vare kylning av brandens flamma. Man genomförde även praktiska brandförsök för att utveckla ett släcksystem för ubåtar. Försöken var inte särskilt framgångsrika men visade att vattendimma hade en viss potential vad gäller brandsläckning och kylning. Några verkliga installationer gjordes aldrig.

Eftersom användningen av Halon 1301 blev så omfattande under 1980-talet svalnade intresset för vattendimma. När beslutet om avveckling togs 1990 vaknade dock intresset igen. Ett flerårigt forsknings- och utvecklingsprogram initierades och startade med småskaliga försök i ett 3 m x 3 m x 2,4 m (höjd) utrymme. Brandkällorna bestod av både exponerade och obstruerade träribbstaplar och poolbränder. Brändernas storlek och placering liksom avstånd mellan systemets munstycken, vattenflöde, spridningsbild, droppstorlek, etc samt graden av ventilation, obstruktioner, hörneffekter och inverkan av syrekonzentration varierades. Följande slutsatser kunde dras av försöken:

- Stora bränder är mer lättsläckta än mindre bränder, huvudsakligen beroende på ökad förångning och syresänkning i rummet av själva branden.
- Obstruerade bränder var svåra att släcka när avståndet mellan branden och munstycken ökade. För de munstycken som provades var 0,6 m ett kritiskt avstånd.
- Obstruerade bränder placerade där ”koncentrationen” av vattendroppar var låg, till exempel högt upp, inne vid hörnet av rummet var svåra att släcka.

- Under välventilerade förhållanden är bränder svåra att släcka. Jämfört med gassläcksystem förefaller dock vattendimma bättre än gassläcksystem.
- Glödbränder i fibröst material är svåra att helt släcka, men ofta släcks eller dämpas brandens flamma.
- Vattendimma förbättrar miljö i rummet eftersom rummet kyls och rökgaserna ”tvättas”.
- Även bränder som är mycket dolda av obstruktioner är möjliga att släcka förutsatt att bränderna är stor i förhållande till rummets volym så att syresänkningen är kraftig och mycket vattenånga bildas.
- Vattendimma kräver relativt låga vattenflöden, brandsläckning erhöles vid mellan 0,17 - 1,7 L/min/m<sup>3</sup>.
- Additiver kan förbättra släckförmågan men kan innebära problem med toxicitet och korrosion.

De småskaliga försöken följdes av försök i större skala. Målsättningen var att utveckla dimensioneringsunderlag och installationsanvisningar för verkliga maskinrum. De flesta försöken genomfördes på US Navy's forskningsfartyg ex-USS Shadwell i Mobile, Alabama. Maskinrummet där försöken genomfördes var i två våningar och hade en bruttovolym om 960 m<sup>3</sup>. Försöksbränderna var upp till 10 MW och bestod av en kombination av oljespraybränder, dolda oljespraybränder och poolbränder med både heptan och diesel som bränsle. Vid försöken gjordes jämförelser mellan en uppställning utan speciellt mycket utrustning i maskinrummet och en uppställning där en motor mock-up, reducerväxellåda, gasturbin och tillhörande ventilationskanaler, etc installerades. Vid några av försöken ventilerades maskinrummet för att simulera det ventilationsflöde som är typiskt för ett fartygsmaskinrum. Flera olika typer av system utvärderades, ett med högt vattentryck, ett med lågt och ett system med munstycken för pneumatisk sönderdelning av vattnet. Man kunde dra följande slutsatser från försöken:

- Det bästa systemet var det med högt tryck, 70 bar. Det munstycke som användes var ett modifierat munstycke från Spraying Systems Co.
- Bäst resultat erhöles när munstycken var placerade i två nivåer, vid taknivå på respektive våningsplan.
- Rekommenderat avstånd mellan munstycken var 2,5 m med tillräckligt många munstycken för att åstadkomma ett totalt vattenflöde på 0,4 L/min/m<sup>3</sup>.
- I allmänhet var släcktiderna kortare än en minut, med undantag av små, dolda bränder i de fall då ventilationen var på.
- Gastemperaturen i rummet sjönk från 500°C till 50°C inom loppet av några få sekunder när systemen aktiverades.
- Den generella slutsatsen var att vattendimma är ett praktiskt möjligt alternativ till Halon 1301 för flottans fartygsmaskinrum.

Efter att alla försöksresultat analyserats tog man beslutet att installera vattendimma i huvudmaskinrummet på US Navy's nästa generations fartyg, LPD-17. Flottan hade redan

tidigare fattat beslut om att dessa fartyg skulle vara fria från halon. När man jämförde vattendimma och gassläckmedlet FM-200 med Halon 1301 ur några olika aspekter stod sig vattendimma väl, se nedanstående tabell.

*Tabell 8 Jämförelse mellan Halon 1301, FM-200 och vattendimma för US Navy's fartyg, LPD-17.*

	Halon 1301	FM-200	Vattendimma
Totalvikt	21,1 ton	43,4 ton	43,7 ton
Utrymmesbehov (area)	45 m <sup>2</sup>	140 m <sup>2</sup>	42 m <sup>2</sup>
Kostnad för ingående komponenter	\$ 220 000	\$ 540 000	\$ 330 000
Relativ kostnad för installerat system	1,0	3,0	1,5

Man analyserade även systemlösning för systemet vad gäller vattenförsörjning, generering av tryck och flöde, rörmaterial och ventiler, etc. Systemlösningen valdes för att minimera installationskostnaden samt utrymmes- och viktsbehov. Man gjorde även livscykelanalyser och tog hänsyn till risk för skada vid strid och underhållsvänlighet. För LPD-17 fartygen innebar det en lösning med två stycken pumpstationer, en placerad i fartygets för, på babords sida och en placerad i akterdelen, på styrbords sida. Vardera pumpstation är försedd med en sötvantentank för 15 minuters varaktighet och en eldriven högtryckspump. Ett huvudstamrör i rostfritt stål drogs genom fartyget så att det passerade alla fem maskinrum. Med hjälp av fjärrstyrda ventiler kunde sedan vattnet distribueras till respektive utrymme.

Det munstycke som var det bästa i fullskaleförsöken optimerades i en serie brandförsök och systemet utsattes för miljöprovningar för att säkerställa att det klarar miljön i ett fartygsmaskinrum.

En annan frågeställning som studerades var inverkan av vattendimma på spänningssatt elektrisk utrustning. Försök med utrustning representativ för maskinrummen på LPD-17 fartygen, trefas elmotorer, motorskydd och instrumenttavlor gjordes. Vattendimma sprayade på utrustningen. För att vara på den säkra sidan var vattenflödet 60% högre än vad som var avsett för maskinrummen. Vid de flesta försöken användes dricksvatten, men några försök gjordes också med bräckt vatten och havsvatten. Läckströmmar i utrustningen mättes och man kunde konstatera att konduktiviteten i saltfritt vatten är väldigt låg. Risken för elchocker existerade bara efter längre tids påföring. Slutsatsen för LPD-17 var att (1) sannolikheten för elchocker är låg och att (2) personal inte behöver evakuera utrymmet innan aktivering av systemet, även om all utrustning är spänningssatt.

### **5.1.1.2 Forskning och utveckling vid Royal Navy**

Royal Navy använder Halon 1211 och 1301 på huvudparten av sina yfartyg och ubåtar. Efter förbudet mot att använda halon har man målmedvetet forskat [32, 33, 34] kring alternativ, både för ersättning på befintliga enheter och på framtida fartyg. En viktig utgångspunkt har varit att nya alternativ inte skall ha lägre effektivitet eller innebära ökade personrisker jämfört med halon. Arbetet har koncentrerats på alternativa gassläckmedel och vattendimma. För många av de alternativa gassläckmedlen finns det dock betänkligheter vad gäller toxicitet, miljöaspekter, oförmåga att kyla heta ytor och potentialen att toxiska nedbrytningsprodukter bildas. Den sista punkten kan få allvarliga konsekvenser på ett krigsfartyg eftersom det skyddade utrymmet behöver återbemannas och tas i drift så snart som möjligt efter en brand. Speciellt om fartyget är involverad i stridshandlingar. Därför har det mesta av arbetet fokuserats kring vattendimma.

Det finns ett antal grundkrav som flottan behöver ställa på sina släcksystem. Det innebär att valet av halonalternativ är ett mycket svårt problem. Några av de problem som finns är:

- **Systemets släckförmåga.** Kravet är att i princip alla bränder skall kunna släckas så att utrymmet snabbt kan tas i drift igen efter en brand. Om fullständig släckning inte är möjlig så skall systemet klara att dämpa eller kontrollera branden, så att manuell släckning kan initieras.
- **Fler olika typer av bränder.** Bränder kan uppstå i dieselloja, flygbränsle och smörj- eller hydraulolja, både som pool- och spraybränder. Dessutom kan bränslena absorberas i isolering och det finns även brandrisker i form av kablage och annan elutrustning.
- **Rumsvolymen.** Varierar från omkring 300 upp till 2500 m<sup>3</sup>, men de flesta maskinrum är normalt omkring 500 m<sup>3</sup>. Utrymmena är byggda av stål, är ofta fyllda med olika typer av utrustning, obstruktioner, varierande däckshöjd och har ofta utrymme under durkplåtar.
- **Ventilationen.** All mekanisk ventilation stoppas normalt vid brand. Dessutom stängs dörrar, luckor och spjäll. Men om fartyget befinner sig i strid kan skador uppstå som skapar hål och öppningar av okänd storlek och placering.
- **Bemannning.** Maskinrum på befintliga fartyg är ofta obemannade, men kontrolleras regelbundet vid vaktronder. Vid strid bemannas dock maskinrummen. Den framtida utvecklingen går mot ökad automatisk övervakning och mindre antal besättningsmän
- **Existerande släcksystem.** De flesta fartyg har system med Halon 1301 kompletterat med ett konventionellt vattenspraysystem anslutet till havsvattnet. Ibland finns möjligheten att tillsätta skumvätska, AFFF. Många fartyg har koldioxidsystem istället för halon. Dessutom finns utrustning för manuell brandsläckning.
- **Insatsstrategi vid brand.** I första hand försöker man släcka en brand manuellt. Samtliga besättningsmän har utbildning i brandbekämpning. Släcker man inte branden i detta skede används det fasta släcksystemet.
- **Tillförlitlighet.** Kravet är att släcksystemen skall vara tillförlitliga och i fallet med vattenbaserade system, relativt enkelt uppbyggda. Systemen skall klara havsvatten av låg kvalitet, vara miljötåliga, kunna klara vissa variationer i vattentryck och ha rimligt låg underhållskostnad.

För några år sedan inleddes ett flerårigt forsknings- och utvecklingsprogram för att undersöka för- och nackdelar med olika system och för att hitta den typ av system som bäst passar Royal Navy's kravspecifikation. De flesta av försöken genomfördes i ett provrum med måtten 8 m x 4 m x 3 m (höjd), alltså med en volym om 96 m<sup>3</sup>.

Hela projektet består av åtta delprojekt varav fem var avslutade år 1999. Här ges en kort sammanfattning av dessa delprojekt.

**Delprojekt 1.** Avsikten var att dokumentera släckeffektiviteten hos de släcksystem som används i dagsläget, nämligen Halon 1301, koldioxid och vattenspraysystem. De båda gassläcksystemen dimensionerades och installerades i enlighet med de anvisningar som flottan använder. Det vattenspraysystem som användes bestod av två stycken Wormald

MV34 munstycken. Systemet provades vid det vattentryck som är vanligt på fartygen, nominellt 7,0 bar och, för att undersöka inverkan av trycket, även vid 3,5 bar.

Resultaten visade att Halon 1301 är mycket effektivt, speciellt mot vätskebränder. Koldioxidssystemet släckte också alla bränder, men med längre tid till släckning. Vattenspraysystemets effektivitet påverkades märkbart av vattentrycket och munstyckena tappade i effektivitet när trycket sänktes. Vid 7,0 bar släcktes dock de flesta av bränderna även om släcktiderna i vissa fall var långa.

**Delprojekt 2.** I detta delprojekt identifierades olika kommersiella munstycken för vattendimma. En förstudie visade att system med lågt vattentryck var att föredra framför system med högt tryck. Ett skäl till detta är att skador vid strid kan påverka integriteten hos det skyddade utrymmet. System med lågt tryck är mindre känsliga för variationer vad gäller graden av ventilation. Ett annat skäl är att pumparna för havsvattenanslutningen klarar upp till 7 bars tryck och att munstycken med större munstycksöppningar inte är så känsliga för låg vattenkvalité.

Studien visade att två grupper av munstycken fyller de krav som ställdes upp. För det första, munstycken som är speciellt tillverkade för vattendimma och, för det andra, modifierade vattenspraymunstycken.

**Delprojekt 3.** I detta projekt utvärderades de munstycken som studien i delprojekt 2 hade identifierat som lämpliga. Målsättningen var att undersöka munstyckenas förmåga att transportera vattendimma och kombinerat med förmågan att samtidigt även producera små vattendroppar.

Försöken gick tillväga så att vattendistribution och droppstorleksfördelning mättes med uppsamlingskärl och en laserdiffraktionsutrustning. Vattensprayernas förmåga att absorbera värme mättes under en kalorimeter. Som brandkälla användes en 445 mm diameter balja med heptan. Branden utvecklade 193 kW. Resultaten visade att de munstycken som liknade sprinkler var mer effektiva vad gäller att reducera brandeffekten men producerade mindre mängd vattendimma. För de munstycken som producerade mindre vattendroppar var förhållandet det omvända. I vissa fall ökade brandeffekten när vattendropparna träffade bränsleytan. Resultaten summeras i nedanstående tabell.

Tabell 9 Resultat från försök där vattendistribution, förmåga att bilda vattenånga samt att reducera brandeffekt mättes.

System	Vattentryck [bar]	Medelvatten täthet [L/min/m <sup>2</sup> ]	Diameter 3 m från munstycke [m]	Medeldropp storlek [µm]	Påverkan på brandeffekt [kW]	Bildning av vattenånga [%]
AM4	3,5	0,245	2,0	153	-14	14,28
	7,0	0,325	2,25	155	+5	19,44
GW K-15	3,5	1,384	3,0	200	-30	4,93
	7,0	1,856	3,5	258	-48	4,09
CL7	3,5	0,944	3,5	230	-5	4,97
	7,0	1,015	3,0	237	Släckning	Släckning
MV10	3,5	0,950	3,5	211	+5	5,60
	7,0	1,289	3,5	207	-113	1,86
MD	3,5	0,714	4,0	161	-33	3,97
	7,0	0,991	4,0	150	-24	4,40
SS	3,5	1,648	5+	383	-34	2,40
	7,0	2,905	5,0	246	Ej provat	Ej provat

Försöken visade att det kan vara stora skillnader mellan olika typer av munstycken. Valet av det mest optimala systemet är mycket beroende av förutsättningar och skyddsmål. För systemen med de minsta vattendropparna är det viktigt att det skyddade utrymmet är tätt. Eftersom det inte går att garantera detta på de aktuella fartygen gjordes bedömningen att sådana system inte är till fyllest. Fyra av de munstycken som provades kombinerar förmågan att producera mindre vattendroppar med större. De kombinerar alltså förmågan att fylla en volym med vattendroppar, reducera syrekoncentrationen, kylning av gasvolymen och låg vattenförbrukning med förmågan att transportera en additiv, god penetrationsförmåga och förmåga att kyla ytor. Av dessa skäl valdes därför dessa fyra munstycken ut för fortsättningen av försöksprogrammet.

**Delprojekt 4.** I detta projekt utvärderades flera olika additiver. Två typer av munstycken användes, dels det mest lovande från delprojekt 3, GW LoFlow K-15, dels de MV34 munstycken som användes i delprojekt 1. Fem olika additiver (skumvätskor) provades, två olika av AFFF typ, en av typ FFFP, ett relativt nytt ”miljövänligt” vätnedel kallat Fire Stopper och ett annat vätnedel kallat Fuel Buster. Alla additiver användes vid den koncentrationen som rekommenderades av tillverkaren. Som brandkälla användes en 445 mm diameter balja med diesel.

Resultaten visade att alla additiver, med undantag av Fuel Buster, dramatiskt förbättrade släckförmågan. Vid den sammantagna värderingen av både släckförmåga och förmåga att förhindra återantändning var FFFP skummet det bästa, tätt följt av de båda AFFF skummen. Men eftersom AFFF är det skum som används i nuläget beslutades att trots allt gå vidare med det i det fortsatta försöksprogrammet.

**Delprojekt 5.** I detta projekt kombinerades de bästa munstyckena från delprojekt 3 med den bästa additiven från delprojekt 4. Denna försöksserie var mer omfattande vad gäller olika typer av bränder och både en fibrös brand och ett antal olika vätskebränder

användes. Försöken genomfördes både med och utan additiv för att få en uppfattning om dess inverkan. Fyra olika typer av munstycken enligt nedanstående tabell provades. Skumvätska av typ AFFF som uppfyller kraven i Mil Spec F2341C användes tillsammans med havsvatten.

Tabell 10 De munstycken som användes i delprojekt 5.

System	Munstycks öppning [mm]	Vatten- flöde vid 3,5 bar [L/min]	Vatten- flöde vid 7,0 bar [L/min]	K-faktor	Rekommen- derat vattentryck [bar]	Max. avstånd mellan munstycken [m]	Max. avstånd till vägg [m]
GW K-15	5,0	28,0	40,0	15	6,0 - 16,0	3,5	1,75
GW K-20	10,0	37,4	52,9	20	6,0 - 16,0	3,5	1,75
MV10	5,1	30,0	42,0	15,9	1,4 - 7,0	Ej angivet	Ej angivet
CL7	7 st x 1,0	29,0	41,0	15,5	0,7 - 7,0	Ej angivet	Ej angivet

Försöken genomfördes med samma förutsättningar som de tidigare försöken, för att få ett så bra jämförelseunderlag som möjligt. Ett enda vattentryck användes, 7,0 bar, eftersom det är det nominellt tillgängliga trycket i praktiken.

Resultaten visade en markant förbättring av tiden till släckning för vätskebränderna när AFFF användes. Släcktiderna minskade med mellan 85% och 99%. Det var även möjligt att släcka fler av bränderna. För de fibrösa bränderna noterades ingen egentlig förbättring, i vissa fall försämrades till och med resultaten. Totalt sett var dock ändå resultaten fullt acceptabla.

**Slutsatser och framtida insatser.** Forsknings- och utvecklingsprogrammet för Royal Navy startade med en studie av för- och nackdelar för typiska hög- och lågtryckssystem. Det stod tidigt klart att det finns vissa skillnader för olika scenarier, framförallt vad gäller ventilationsgraden, inverkan av det skyddade utrymmet och obstruktioner för vattnet. Studien inriktades mot att studera lämpliga additiver för system med lågt vattentryck. Med denna inriktning gick det att lösa de problem som alla system med vattendimma har att släcka små bränder och bränder i välventilerade utrymmen. Med ett lågt arbetstryck kan man använda befintliga pumpar och havsvattenanslutning.

När fyra olika system provades med AFFF erhöles snabb släckning, fullt jämförbar med släcksystem med inertgaser, och betydligt snabbare och med mindre vattenmängder än de traditionella munstycken som används idag. System kräver dock att fler munstycken installeras jämfört med de traditionella systemen.

I delprojekt 6 planerar man att undersöka effektiviteten mot spraybränder, i delprojekt 7 planeras försök i en uppställning i full skala och i det avslutande delprojektet planeras installationsanvisningar för systemen.

## 5.1.2 Gasturbiner

Traditionellt sett har gasturbinanläggningar brandskyddats med antingen koldioxid eller Halon 1301. Systemen med Halon har vanligtvis aktiverats automatiskt vid brand och systemen med koldioxid antingen automatiskt eller manuellt [35].

Gasturbiner används för elektrisk eller mekanisk kraftgenerering och flytande eller gasformiga bränslen med hög brandfarlighet används. Gasgeneratorn utgör i sig en

tändkälla för läckande bränsle och smörjolja eftersom den har yttemperaturer som överstiger bränslenas antändningstemperatur. Vissa områden på gasturbinen är försedd med mineralullsisolering. Ett litet läckage av bränsle (under lång tidsperiod) kan absorberas i denna isolering och antändas när bränslet har nått ned till den heta ytan. Men det finns även brandrisker i form av kablage och annan elutrustning.

Förutom ovanstående brandrisker finns en helt annan aspekt vad gäller gasturbiner. Det är att det finns en risk att vatten på gasturbinens heta ytor förorsakar sprickbildning, deformationer eller andra skador på grund av snabb nedkylning. Det gör att ett system med vattendimma kan behöva dimensioneras så att det påför vatten i korta sekvenser. (Detta kan även förkorta tiden till släckning, vilket diskuteras nedan).

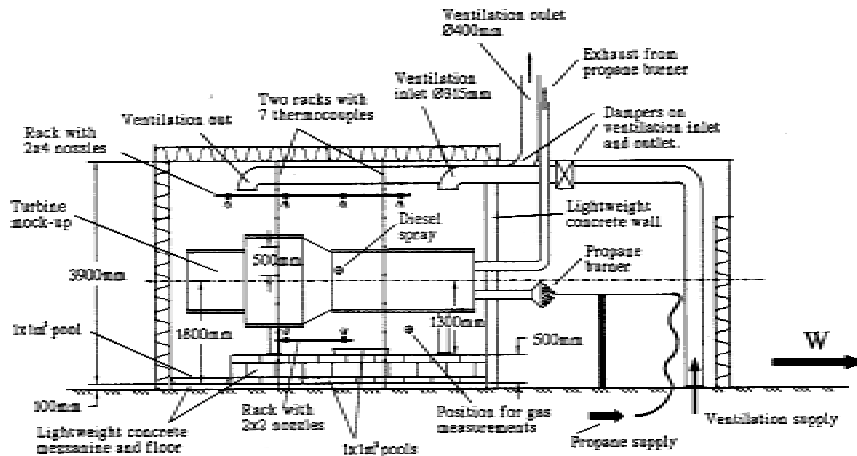
System med vattendimma har den fördelen jämfört med gasläcksystem att de kan aktiveras automatiskt, utan personrisk. Systemen är billiga att återfylla och speciella brandspjäll som stänger ventilationskanaler är inte absolut nödvändiga.

Flera försöksserier finns dokumenterade där system med vattendimma provats för gasturbiner. I början av 1990-talet genomförde British Petroleum (BP) tillsammans med den svenska gasturbinleverantören ABB-STAL tre försöksserier [35, 36, 37, 38, 39] vid det norska brandlaboratoriet vid SINTEF. Försöken genomfördes i rum med 30 m<sup>3</sup>, 70 m<sup>3</sup> och 130 m<sup>3</sup> volym. En realistisk modell av en gasturbin användes i rummet med 70 m<sup>3</sup>. Förutom själva systemet varierade man parametrar som typ av brand, brandens storlek, temperatur i inneslutningen (om turbinen var ”i drift” eller ej), ventilationen och om dörr och spjäll var öppna eller stängda.

Man drog bland annat följande slutsatser från försöken:

- Efter 40 sekvenser där vattendimma påfördes i 10 sekunders pulser kunde inga sprickor upptäckas i ”gasturbin”röret.
- Bränder mellan 1 MW och 8 MW släcktes i samtliga fall inom 10 sekunder det vill säga under den första påföringspulsen.
- När ”gasturbinens” mineralullsisolering genomdränktes med dieselolja släcktes bränderna under den första påföringspulsen, men branden återantände så länge yttemperaturen på ”gasturbinens” mantel översteg oljans antändningstemperatur.
- Mindre bränder, som var dolda för direkt påföring var svårsläckta. Dessa mindre bränder släcktes endast om vattendropparna direkt träffade branden.





Figur 8 Den realistiska modell av en gasturbin i ett utrymme om  $70 \text{ m}^3$  som användes vid försöken vid SINTEF.

Även National Research Council of Canada har genomfört försök [40, 41] i en uppställning där en gasturbin simulerades. Avsikten med försöken var att undersöka betydelsen av att påföra vattendimma i korta sekvenser jämfört med kontinuerlig påföring. Försöken genomfördes i ett rum med en volym om  $121 \text{ m}^3$ . I rummet placerades en modell av en gasturbin, identisk med den som föreskrivs i Factory Mutual's provningsmetod. Totalt installerades fjorton stycken munstycken som sönderdelade vattnet pneumatiskt till vattendimma. Munstyckena gav ett vattenflöde på  $5 \text{ L/min}$  och det totala vattenflödet var alltså  $70 \text{ L/min}$  i hela utrymmet. Två olika påföringssätt användes, antingen kontinuerlig påföring av vatten eller i regelbundna sekvenser om 30 sekunder med 20 sekunders paus.

Pool- eller spraybränder med heptan användes som brandkälla. Alla bränder var dolda under en stålplåt så att vattnet inte träffade direkt. Brandeffekten var  $150 \text{ kW}$  respektive  $500 \text{ kW}$  för de två poolbränderna och  $520 \text{ kW}$  för spraybränden. Förbrinntiden innan aktivering av systemet var 30 sekunder.

Slutsatsen från försöken var att sekventiell påföring reducerade tiden till släckning jämfört med kontinuerlig påföring. Den totala vattenförbrukningen var därmed också lägre vid sekventiell påföring. Störst skillnad mellan de olika påföringssätten uppvisades när dörren till utrymmet var öppen och när ventilationen till utrymmet var i drift.

Anledning till att sekventiell påföring reducerar tiden till släckning är att syrekonzentrationen i utrymmet sjunker snabbare. När vattenpåföringen stoppas tillväxer branden, vilket i sig sänker syrehalten. När sedan påföringen initieras igen är utrymmet uppvärmt och relativt mer vatten förångas.

### 5.1.3 Motorprovrum för jetmotorer

U. S. Air Force (USAF) har motorprovrum där man provkör jetmotorer (hela flygplanet ryms i utrymmet och piloten sitter i cockpit under provkörningarna). Dessa rum är försedda med Halon 1301 system. I februari 1994 genomfördes [42] ett antal brandförsök där man studerade möjligheterna att använda vattendimma i ett representativt

motorprovrum. Rummets dimensioner framgår inte av referensen, men från en skiss kan man uppskatta att rumshöjden sannolikt var över 6 meter.

Släcksystemet bestod av ett rörsystem monterat i tak med upp till 45 munstycken kopplat via en ventil till ett batteri med 40 stycken högtryckscylindrar. Dessa cylindrar fylldes med vatten och trycksattes med kvävgas upp till 280 bar. Dessutom fanns möjlighet att installera 10 stycken munstycken i två vertikala rader på ömse sidor om motorprovrummets frånlufts kanal.

Sex stycken försök med flygbränsle (JP-4) genomfördes. Tre av dessa var med poolbrand i en 2,3 m<sup>2</sup> balja som placerades under en mock-up av ett flygplan. De andra tre försöken var av mer tredimensionell karaktär där bränsle flödade från mock-upens ”motor” ned i en balja placerad på golvet. En frånluftsfläkt placerades i motorprovrummets frånlufts kanal. Före varje test dränerades släcksystemets rörsystem för att simulera verkliga förhållanden vad gäller den tid det tar att fylla upp rören med vatten. Alla luftintag och frånlufts kanalen öppnades. Bränderna antändes manuellt och tilläts brinna så länge att de stabiliserades och därefter aktiverades systemet varvid alla dörrar och luftintag stängdes. Temperaturer i rummet mättes under tio minuter eller tills dess att alla bränder brunnit ut.

Resultaten från försöken visas i nedanstående tabell. Endast i ett fall släcktes branden, för att sedan återantändas av heta metallytor. I samtliga fall kontrollerades temperaturerna så pass att skadorna på ett verkligt flygplan skulle minimeras tills dess att manuell brandsläckning är möjlig. Om någon av dörrarna till rummet öppnas innan branden är släckt kan man dock räkna med att branden flammar upp när friskluft strömmar in. Tabellen visar hur lång tid det tog för temperaturen att reduceras till under 50°C så att piloten i cockpit kan överleva i väntan på att manuell brandsläckning initieras.

Tabell 11 Resultat från försöken i U. S. Air Force motorprovrum.

Försök	Typ av brand	Tid till släckning [min:s]	Tid tills dess att temperaturen i cockpit understeg 50°C	Påföringstid [min:s]
1	2-D	Släckte ej	1:30	7:13
2	2-D	4:46, återantände 9:59	1:36	6:41
3	2-D	Släckte ej	Inträffade ej, lägsta temperatur 93°C	
4	3-D	Släckte ej	Inträffade ej, lägsta temperatur 560°C	10:18
5	3-D	Släckte ej	Inträffade ej, lägsta temperatur 477°C	4:28
6	3-D	Släckte ej	1:05, började stiga över 120°C vid 2:20	4:31

De slutsatser man drog av försöken var att systemet inte klarade att släcka bränderna, men håller en brand under kontroll så att åtgärder för manuell brandsläckning kan sättas in. Vattendimman som sådan har inte någon negativ effekt på flygplanen eftersom påföringen inte är större än lätt regn eller kraftig dimma. Man bedömde också tillförlitligheten hos systemet, vilken föreföll vara god. Systemet innehåller ingen avancerad elektronik, komplicerad teknik eller korrosiva material. Underhållet bör kunna hållas på en låg nivå med hög tillgänglighet.

## 5.2 Rumsmiljö, låg- och normal riskklass

### 5.2.1 Passagerarfartyg

De installationsregler och provningsmetoder som det internationella sjösäkerhetsorganet IMO tagit fram för alternativa, ”ekvivalenta” sprinklersystem har tillämpats sedan 1994, se kapitel 3.1. Ett flertal tillverkare har fått sina system godkända av klassningsällskap och nationella sjöfartsmyndigheter och systemen har installerats på hundratals större och mindre passagerarfartyg som omfattas av IMOs regelverk. Dessutom installeras system på mindre yachter och liknande mindre fartyg som inte omfattas av IMOs regelverk utan är underställda krav från nationella sjöfartsmyndigheter.

De allra flesta godkännanden baseras på brandförsök som är genomförda av tre nordiska brandlaboratorier, SP Brandteknik, VTT i Finland och det norska brandlaboratoriet under SINTEF. De komponentförsök som också krävs har i de flesta fall utförts av antingen Det Norske Veritas (DNV) i Norge eller vid Factory Mutual Research Corporation (FMRC) eller Underwriters Laboratories (UL) i USA.

I nedanstående två tabeller visas installationskriterier för två olika system som båda har klarat kraven i IMO A.800(19). I om med detta kan systemen installeras i inredningen ombord på fartyg som ett alternativ till traditionella sprinkler. Det första exemplet visar ett system som dimensioneras med ett vattentryck runt 7 bar, alltså något högre än traditionell sprinklerteknik. Munstyckenas täckningsyta är lägre än för traditionella sprinkler, men å andra sidan är den beräknade vattentätheten ungefär hälften.

Tabell 12 Ett exempel som visar hur ett lågtryckssystem dimensioneras för olika utrymmen på ett passagerarfartyg.

Utrymme	Tryck [bar]	Vattenflöde per munstycke [L/min]	Maximalt avstånd mellan munstycken [m]	Maximal täckningsyta [m <sup>2</sup> ]	Beräknad vattentäthet [mm/min]
Hytt ≤ 12 m <sup>2</sup>	7 bar	12,4 L/min	2,4 m	6 m <sup>2</sup>	2,1 mm/min
Hytt 12 - 25 m <sup>2</sup>	7 bar	12,4 L/min	2,5 m	6,25 m <sup>2</sup>	2,0 mm/min
Hytt 25 - 50 m <sup>2</sup>	7 bar	24,3 L/min	3,5 m	12,25 m <sup>2</sup>	2,0 mm/min
Korridorer, bredd ≤ 1,5 m	8 bar	13,3 L/min	1,8 m	2,7 m <sup>2</sup>	4,9 mm/min
Publika lokaler, höjd ≤ 5,0 m	7 bar	24,3 L/min	2,8 m	7,8 m <sup>2</sup>	3,1 mm/min

Det andra exemplet visar ett högtryckssystem med 60 bars vattentryck. I det fallet är munstyckenas täckningsyta jämförbar med traditionella sprinkler men vattentätheten betydligt lägre.

Tabell 13 Ett exempel som visar hur ett högtryckssystem dimensioneras för olika utrymmen på ett passagerarfartyg.

Utrymme	Tryck [bar]	Vattenflöde per munstycke [L/min]	Maximalt avstånd mellan munstycken [m]	Maximal täckningsyta [m <sup>2</sup> ]	Beräknad vattentäthet [mm/min]
Hytt ≤ 12 m <sup>2</sup>	60 bar	6,2 L/min	Ett munstycke	12 m <sup>2</sup>	0,5 mm/min
Hytt 12 - 50 m <sup>2</sup>	60 bar	6,2 L/min	3,5 m	12,25 m <sup>2</sup>	0,5 mm/min
Korridorer, bredd ≤ 1,5 m	60 bar	5,6 L/min	4,0 m	6 m <sup>2</sup>	0,95 mm/min
Publika lokaler, höjd ≤ 2,5 m	60 bar	10 L/min	3,0 m	9 m <sup>2</sup>	1,1 mm/min
Publika lokaler, höjd ≤ 5,0 m	60 bar	19,4 L/min	3,0 m	9 m <sup>2</sup>	2,15 mm/min

## 5.2.2 Bostäder

U.S. Fire Administration (USFA) har finansierat två projekt för att undersöka möjligheterna att använda system med vattendimma i bostadsmiljö, som ett alternativ till bostadssprinkler. I första hand har det varit möjligheterna att reducera vattenbehovet som var det mest intressanta. Det finns nämligen många områden i USA där tillgången på vatten minskar möjligheterna att använda bostadssprinkler.

I den första studien [43] undersöktes möjligheterna att använda vattendimma för den typ av brandscenarier som är aktuella i bostäder. Flera olika typer av bränder användes för att undersöka om de brandscenarier som används för att prova bostadssprinkler även kan användas för att prova system med vattendimma. Genom att prova flera typer av system och flera typer av brandkällor ville man även få ett begrepp om vilka försöksparametrar som påverkar resultatet. Försöken genomfördes i försöksrum som var 6,7 m långt, 3,7 m brett samt med en takhöjd om 2,4 m. Rummet ventilerades via två stycken dörröppningar och en fönsteröppning. Fem typer av system provades och för jämförelsens skull användes även bostadssprinkler i vissa av försöken. Systemen inkluderade ett lågtryckssystem (trycket varierades mellan 2,1 - 6,9 bar), tre olika högtryckssystem (två system med 69 bar arbetstryck, det tredje med 200 bar tryck) samt ett ”dual-fluid” system (luft 6,9 bar och vatten 1,4 - 5,5 bar). Samtliga system fick sin vattenförsörjning via en pump förutom ett av högtryckssystemen som var kopplat till trycksatta vattenbehållare. Trycket för detta system var därför initialt 200 bar men det sjönk successivt vartefter vattennivån i cylindrarna sjönk. Systemen aktiverades antingen termiskt (glasbulb eller smältbleck) eller med hjälp av rökdetektor. Bedömningen av försöksresultaten baserades på huruvida systemen klarade att släcka eller kontrollera de olika bränderna och på nivån av kolmonoxid och koldioxid i försöksrummet.

Stora variationer i försöksresultat observerades beroende på typ av brand, graden av ventilation och typ av system. Endast två av de system som provades visade någorlunda genomgående bra resultat. För dessa system var det därför möjligt att ta fram preliminära installationsanvisningar, se nedanstående tabell.

Tabell 14 Preliminära installationsanvisningar för de system som visade någorlunda genomgående bra försöksresultat.

	System B	System E
Munstycksstorlek	4 x 1,0 mm	Konfidentiell
Tryck	172 - 200 bar	4,5 - 6,6 bar
Flöde per munstycke	15,4 L/min	12,3 - 14,1 L/min
Täckningsyta per munstycke	ca 11,6 m <sup>2</sup>	ca 4,1 m <sup>2</sup>
Vattentäthet	1,3 mm/min (L/m <sup>2</sup> /min)	3,0 - 3,5 mm/min (L/m <sup>2</sup> /min)
Volymkoncentration	530 g/m <sup>3</sup>	1300 - 1500 g/m <sup>3</sup>

Installationskostnaden för dessa två system uppskattades. Kostnaden för lågtryckssystemet är cirka \$3,20/ft<sup>2</sup> (cirka 275 kr/m<sup>2</sup>). Kostnaden är baserad på att en tryckstegringspump ingår och att plaströr kan användas. Denna kostnad kan jämföras med cirka \$2/ft<sup>2</sup> (cirka 170 kr/m<sup>2</sup>) för bostadssprinkler (inklusive kostnaden för en pump och en vattentank). Kostnaden för högtryckssystemet uppgår till \$8,80/ft<sup>2</sup> (760 kr/m<sup>2</sup>), alltså nästan tre gånger så mycket som för lågtryckssystemet och fyra och en halv gånger så mycket som för bostadssprinklern. Den stora skillnaden i installationskostnad är primärt beroende på den högre materialkostnaden.

I övrigt kunde man dra bland annat följande slutsatser;

- Studien visade att vattendimma kan användas för att kontrollera eller dämpa de brandscenarier som kan uppstå i bostadsmiljö.
- Effektiviteten mot lokala glödbränder eller dolda bränder är liten för vattensprayer med små vattendroppar ( $D_{V0,9} < 100 \mu\text{m}$ ) med liten eller ingen penetrationskraft. Försöksresultaten är inte tillräckliga för att dra slutsatsen att vattendroppar mindre än  $100 \mu\text{m}$  är otillräckliga, men det var tydligt att vattensprayer som bestod av en större fraktion vattendroppar med högre initial hastighet var de mest effektiva för de brandscenarier som användes. (Not. Med  $D_{V0,9} < 100 \mu\text{m}$  menas att 90 % av vattenmängden utgörs av vattendroppar mindre än  $100 \mu\text{m}$ ).
- System med  $D_{V0,9}$  mellan 100 och  $300 \mu\text{m}$ , en effektiv vattentäthet mellan 1,3 till 4,5 mm/min och en initial hög penetrationskraft hos vattenprayeren klarade att släcka eller kontrollera bränderna.
- Aktiveringsprincipen (termisk eller rök) påverkade möjligheterna att dämpa branden för flera av systemen. Ytterligare studier krävs dock för att studera detta.
- De påtagliga skillnaderna mellan de olika systemen medför att någon generell dimensioneringsprincip inte kan skönjas. För två av systemen var det dock möjligt att ta fram preliminära installationsanvisningar (se ovan).
- I dagsläget är kostnaden för system med vattendimma högre än för bostadssprinkler.

Baserat på den första studien gick USFA vidare i en andra studie [44, 45]. Avsikten var bland annat att ytterligare studera användningen av vattendimma i bostadsmiljö, att ta fram en provningsmetod samt att ta fram en rekommendation till installationsstandard.

Eftersom den första studien visade att kostnaden för högtryckssystem är för hög valde man att begränsa projektet till lågtryckssystem som använder munstycken med spridarplatta,

liknande traditionella sprinkler. Dessa system kan sannolikt använda plaströr och kräver inte extra rördragning för luft eller annat media för sönderdelningen av vattnet. Man kan dessutom förvänta sig att systemen har en tillförlitlighet som är jämförbar med traditionell sprinklerteknik.

Två kommersiella munstycken och två prototyper användes vid försöken. Munstyckenas K-faktor varierade mellan 4,7 - 11,1 L/min/bar<sup>1/2</sup> och arbetstrycket mellan 7,7 - 11 bar. Avståndet mellan munstyckena var antingen 2,44 m eller 3,05 m. Försöken genomfördes i ett rum med måtten 5,5 m x 5,5 m och med en takhöjd på 2,4 m. Avsikten var att efterlikna ett större vardagsrum i en modern villa eller lägenhet. Som brandscenarier användes standardbranden enligt UL 1626, som används för att prova bostadssprinkler, standardbranden enligt FMRC 2030, ett sovrumbrandsscenario och ett köksbrandscenario.

Man kunde bland annat dra följande slutsatser från försöksserien;

- Lågtryckssystem med vattendimma är kapabla till en skyddsnivå jämförbar med bostadssprinkler med lägre totalt flödesbehov. (Till viss del kan denna vinst sägas vara på bekostnad av att avståndet mellan munstyckena är kortare jämfört med bostadssprinkler. Fler munstycken kommer därför att krävas. Förf. anm.).
- Standardbranden enligt UL 1626 är svårare att klara för lågtryckssystem med vattendimma än standardbranden enligt FMRC 2030.
- Standardbranden enligt FMRC 2030 är svårare att klara för bostadssprinkler än standardbranden enligt UL 1626.

En fördel med den typ av munstycken som provades är att plaströr och annan materiel som normalt används för bostadssprinkler också är användbara för dessa system. Tyvärr medför dock det högre arbetstrycket att systemen inte kan anslutas direkt till det allmänna nätet. Det är emellertid inte ovanligt att trycket i det allmänna nätet inte räcker ens för bostadssprinkler i vissa bostadsområden.

Vad gäller tillförlitligheten för ett bostadssystem med vattendimma som kräver tryckstegringspump, jämfört med bostadssprinkler direkt anslutet till det allmänna nätet, kan man förvänta sig en lägre tillförlitlighet beroende på det ökade antalet ingående komponenter. En beräkning visar att den ökade sannolikheten för felfunktion kan vara 0,03 per år. Det betyder att om 100 system används under ett år kan man förvänta sig att tre system fler får en felfunktion jämfört med bostadssprinkler med matning direkt från det allmänna nätet. Sprinklerstatistik (industri) visar att felfunktionen för ett rätt dimensionerat sprinklersystem är 0,02 - 0,03 [46], vilket ger en uppfattning om storleksordningen hos ökningen. Det huvudsakliga bidraget till den lägre tillförlitligheten är sannolikheten för att den ventil som krävs för att ”isolera” tryckstegringspumpen står stängd. Bidraget från övriga komponenter som pump och tryckvakt är lågt.

Vad gäller igensättning av munstycken visar praktiska försök att detta inte kan förväntas vara något problem för de munstycken som användes i försöksserien. Munstycksöppningarna för de munstycken som användes var cirka 2,5 - 4 mm.

Underwriters Laboratories (UL) har tagit fram en provningsmetod, UL 2167, speciellt anpassad för munstycken för vattendimma avsedda för bostadsmiljö [27]. Provningsmetoden liknar den som används för bostadssprinkler, men begränsar tillämpningen till de byggnader som beskrivs i NFPA 13D. Om endast ett munstycke aktiveras i provningsmetoden skall ett verkligt system dimensioneras för två munstycken,

om två eller tre munstycken aktiveras skall ett verkligt system dimensioneras för fyra munstycken.

### 5.2.3 Stavkyrkor

De norska stavkyrkorna [47, 48] är en av landets främsta kulturskatter och har tillsammans med vikingaskepp blivit en bland Norges främsta nationalsymboler. Kyrkorna är ofta belägna på landsbygden, i områden där både elnät och vattenledningsnät kan ha låg tillförlitlighet, om de överhuvudtaget finns. Under 1990-talet utsattes flera kyrkor för anlagd brand och runt femton kyrkor har brunnit helt eller delvis. I ett stort antal fall har det varit fråga om dåd från satanister.

Sedan år 1982 har det norska riksantikvarieämbetet successivt förbättrat brandskyddet i de norska stavkyrkorna, genom riskanalyser, installation av brandlarm och genom att bilda lokala brandvårn. Sprinkler är också vanligt och före år 1990 var hälften av alla stavkyrkor försedda med någon typ av sprinklersystem. Men historiska byggnader ställer höga krav på att sekundärskadorna minimeras. I vissa fall är kyrkorna försedda med vägg- och takmålningar som är utförda med vattenlöslig färg. Estetiska hänsyn måste också tas vid installationen och så små ingrepp som möjligt göras. Därför blev riksantikvarieämbetet intresserade av att utvärdera andra alternativ, i första hand system med vattendimma.

Vid försök i både småskala och i full skala med brand i stavkyrkor har det observerats att vattendimma inte väter vertikala ytor i någon större omfattning. Eftersom byggnadsmaterialen, dekor och väggmålningar tar skada av vatten är det en egenskap som är högt värderad vid släckning av brand. Vattnet bör vara fritt från tillsatsmedel såsom kemikalier, skumvätska och liknande för att undvika ytterligare påverkan. Försök har också visat att vattendimma ”tvättar” ut rökpartiklar vilket bidrar till att rökskadorna blir mindre vid en brand.

Ett flertal installationer av system är genomförda. Ett exempel är stavkyrkan i Haltdalen, Sør-Trøndelag som är en av de allra minsta och enklaste kyrkorna i Norge. Kyrkan är kvadratisk, 6 m x 6 m och har ett kor på 3 m x 3,5 m. Det system som installerats skyddar själva kyrkorummet, koret, det tomma utrymmet under golvet, ventilationsöppningar, etc. Eftersom kyrkan är så pass liten aktiveras alla munstycken samtidigt med en genomsnittlig vattentäthet på 0,6 L/min/m<sup>2</sup>. Systemet är anslutet till en trycktank med vatten som ger ett systemtryck på 10 bar. Systemet aktiveras av ett separat branddetektionssystem.

### 5.2.4 Bibliotek

Böcker och andra typer av dokument som man hittar i bibliotek är känsliga för både värme, rök och sot. Många gånger innehåller bibliotek sådana dokument som är helt oersättliga och en del av vårt kulturarv. Vatten, både från manuell brandsläckning och från sprinkler kan också orsaka stor skada och det förekommer att sprinkler inte installeras på grund av risken för oavsiktlig aktivering.

Vattendimma har ofta föreslagits som ett alternativ till sprinkler i bibliotek, arkiv och liknande miljöer där det krävs en balans mellan risk för brandskada och den skada som släckmedlet kan åstadkomma. Vattendimma har fördelen av relativt låga vattenflöden och, för vissa typer av system, snabbare aktivering.

University of Maryland i USA har undersökt [49] sambandet mellan tiden till aktivering och möjligheterna att dämpa en brand i biblioteksmiljöer. Vattenflödet är även en funktion av ett flertal andra variabler, antändningskälla, geometri, avstånd mellan hyllor och hyllplan, om hyllorna är täta eller ej, placering av munstycken, etc.

Brandförsök i full skala genomfördes i en uppställning med en centriskt placerad dubbel bokhylla med två stycken enkla bokhyllor på ömse sidor om denna. Gångarna, alltså det fria avståndet mellan bokhyllorna var cirka 810 mm. Bokhyllorna var utförda i stålplåt och hade totalt 6 hyllplan med ett inbördes vertikalt avstånd av 355 mm. Hyllplanen fylldes med antingen böcker med hårda omslag, olika slags tidskrifter med mjuka omslag eller en blandning av båda typerna. Den nedre av de 6 hyllplanen användes dock aldrig. Takhöjden i rummet där försöken utfördes var 2,3 m och hyllorna nådde alltså i princip ända upp till tak. För att bedöma effektiviteten hos släcksystemet instrumenterades hela uppställningen med termoelement.

Det systemet som utvärderades bestod av en högtryckspump (70 bar) och ett rörsystem med avsättningar för munstycken. Grenrör drogs i taket, centriskt i gångarna mellan hyllorna och ovanför spalten på den mittre, dubbla bokhyllan. Avsättningar för munstycken fanns så att avståndet mellan de enskilda munstyckena var antingen 150 mm eller 300 mm. De munstycken som användes sönderdelade vattnet hydrauliskt och producerade relativt små vattendroppar, i storleksordningen 100  $\mu\text{m}$  eller mindre. Systemet (samtliga munstycken) aktiverades manuellt 40 - 50 sekunder efter tändning. Denna tid motsvarade detektionstiden för rökdetektorer i taket, med cirka 20 sekunders ytterligare fördröjning.

I de allra flesta fall anlades branden på det nedersta (andra hyllan). Brandspridningen var mycket snabb och involverade tidningar placerade på det översta hyllplanet inom 15 sekunder. Resultaten visade att systemet klarade att kontrollera branden med enbart munstycken placerade i gångarna mellan bokhyllorna. Med ytterligare munstycken i taknivå, ovanför spalten på den mittre, dubbla bokhyllan förbättrades effektiviteten väsentligt. Därför drogs ett ytterligare grenrör in i den mittre bokhyllan, på halva avståndet över golvnivå. Denna systemlösning var den allra mest effektiva och reducerade temperaturerna mycket snabbt.

Även om antalet försök var relativt få så drog man slutsatsen att vattenflöden i storleksordningen 0,40 - 0,80 L/min/m<sup>2</sup> är nödvändigt för snabb kontroll av branden. En förutsättning för detta var att munstycken var placerade ovanför spalten på den mittre, dubbla bokhyllan. Med munstycken enbart i gångarna mellan hyllorna erfordrades ungefär det dubbla vattenflödet.



### 5.3 Kabeltunnlar

Under 1997 genomfördes brandförsök [50] på Nya Zeeland för att fastställa skyddsmål och installationsanvisningar för system med vattendimma i en kabeltunnel. Den verkliga tunneln har en diameter om cirka 3,1 m, är 9,2 km lång och belägen i medeltal 80 m under mark. Farhågor finns att brand kan uppstå i spillmaterial när kablar sammanfogas, med brandspridning till kablarna på ovanliggande kabelstegar som följd.

För att ta fram ett underlag för upphandling av ett lämpligt släcksystem beslutade man att genomföra en serie fullskaleförsök med ett antal kommersiella system. En försöksuppställning byggdes därför upp i en gångtunnel belägen i anslutning till en idrottsarea. Denna tunnel hade ett tvärsnitt som var jämförbart med den verkliga tunneln.

Fyra olika leverantörer ställde sina system till förfogande för brandförsöken. Det skyddsmål som man ställde upp innebar att systemen skulle klara att begränsa brandgastemperaturen mätt på undersidan av kabelstegen närmast över branden till maximalt 400°C. Detta krav innebar att endast de kablar som var direkt utsatta för en brand skulle behöva bytas ut. De leverantörer vars system som kunde demonstrera att de klarade kraven fick möjlighet att offerera för installation i den verkliga tunneln.

Brandkällan utgjordes av en 250 mm x 250 mm balja (80 mm hög kant) som fylldes med 1 L n-Heptan. Brandeffekten uppskattades till mellan 70 - 90 kW. Under fribrinnande förhållanden brann bränslet ut på cirka 180 s. Den bedömning man gjorde var att brandkällan motsvarade en brand i spillmaterial från kablar under värsta tänkbara förhållanden. Baljan placerades nära tunnelväggen, på den andra kabelstegen räknat från golvnivå. Det innebar att branden var helt skärmad från direkt applicering av vattendimma. Under brandförloppet kom kablarna på nivån över brandkällan att exponeras både på undersida och på översida av branden, eftersom flammorna följde tunnelväggens välvning.

Fläktar användes för att simulera ventilationsflödet i den verkliga tunneln där lufthastigheter upp till 5 m/s kan förväntas.

Ventilationsförhållandena, den lilla brandkällan och obstruktionerna var alla sådana att det var omöjligt för systemen att släcka branden, varken på grund av syresänkning eller direkt kylning av själva flammen. Men försöken visade att brandeffekten (avbrinningshastigheten) till vis del reducerades av systemen eftersom varaktigheten hos brandkällan ökade från 180 s till mer än 360 s.

De leverantörer vars system provades fick identiteterna A, B, C och D, på detta sätt röjdes inte deras verkliga identitet. I samtliga fall monterades munstycken nära tunneltaket. Det var bara system A och C som klarade de skyddsmål som ställdes upp.

System A använde munstycken placerade 1,5 m isär. Vartannat munstycke var riktat åt höger, vartannat åt vänster med en lutning på cirka 30° från lodlinjen. Det nominella vattenflödet var 8,1 L/min per löpmeter tunnel. Detta system hade ett arbetstryck på 12,0 bar.

System C hade även det munstycken placerade med ett inbördes avstånd om 1,5 m. Men munstyckena satt monterade parvis, ett riktat åt höger och ett åt vänster, med en lutning på cirka 45° från lodlinjen. Vattenflödet från varje par munstycken var 11 L/min, vilket motsvarade 7,3 L/min per löpmeter tunnel. Arbetstrycket var 12,0 bar.

System B distribuerade mer vatten per löpmeter tunnel än övriga provade system men klarade ändå inte att hålla brandgastemperaturerna under maximalt 400°C. Avståndet mellan munstyckena var 2,0 - 2,5 m och arbetstrycket mellan 9,6 - 12,0 bar.

System D skiljde sig från de övriga så till vida att munstyckena var anslutna till ett vattenfyllt rörnät anslutet till cylindrar med kvävgas. Trycket i systemet var högt till en början, mer än 50 bar, men avtog i takt med att kvävgasstrycket sjönk. Den initiala hastigheten i vattensprayen var därför till en början hög, och förmågan hos vattendropparna att blanda sig med luften och kyla brandgaserna var till en början god. Förhoppningen var därför att det skulle räcka med att ha så långt som 10 m mellan munstyckena. Det första försöket utfördes med 10 m, det andra med 7,5 m och det sista med 6,0 m avstånd mellan munstyckena. Systemet klarade dock inte att kontrollera branden i något av försöken.

En av de slutsatser man kunde dra från projektet var nödvändigheten att genomföra brandförsök på ett sätt som är representativt för den verkliga applikationen.

## 5.4 Elektronik och datorhallar

En hel del projekt har genomförts där man studerat möjligheterna att använda vattendimma för att skydda elektronik, till exempel dator- eller telekommunikationsutrustning. Det finns även koncept som bygger på vattenskrubning av rökgaser.

Traditionellt har man skyddat elektronik med gassläcksystem, halon 1301 eller koldioxid. På senare år har halonsystemen bytts mot nya släckmedel baserade på halogenerade kolväten eller system med inertgaser. Gassläckmedel har många fördelar, de är icke-konduktiva, fördelar sig relativt jämnt i ett rum och kan tränga in i skåp och kabinett.

### 5.4.1 Skydd av telekommunikationsväxlar

Fire and Safety International i England har undersökt [51, 52] vad som krävs för att skydda telekommunikationsväxlar med vattendimma. Man koncentrerade sig på att skydda enskilda kabinett och undersökte inte rumsskydd eftersom man eftersträvade att inte stänga av den utrustning som inte var drabbad av brand. Försöken genomfördes med kabinett som var helt fyllda med vertikalt stående kretskort (avstånd cirka 10 mm). Det medförde att det bildades vertikala ”kanaler” som tillät vattendroppar från munstycken som placerades på toppen av kabinettet att tränga ned.

Själva släcksystemet var ganska enkelt, det bestod av ett 10 L tryckkärl som fylldes med vatten. Tryckkärlet trycksattes med kvävgas med mellan 2 - 100 bars tryck. Rörsystemet gjorde det möjligt att montera munstycken antingen på toppen av kabinettet, i dess botten eller på dess framsida. Flera olika typer av munstycken provades, bland annat sådana som ger en fylld kon eller en hålkon. Temperaturer mättes i ett flertal punkter i kabinettet och dessutom mättes rökfördunkling, värmestrålning och koncentrationen av HCl.

Brand initierades med en spänningssatt värmetråd och systemet aktiverades när flammor kunde observeras. Normalt tog det mellan 90 - 180 sekunder innan aktivering. Resultaten visade att munstycken med högt arbetstryck, fylld kon och med en smal spridningsvinkel fungerade bäst. Dessa munstycken kunde upprepade gånger släcka bränderna inom ett par sekunder med mindre än två liters total vattenförbrukning.

Munstycken med lågt arbetstryck, hög vattenförbrukning och större vattendroppar använde mer vatten och gav längre släcktider. Vattendropparnas förmåga att passera obstruktioner i form av kretskort och andra komponenter var sämre.

Även när munstycken monterades uppåtriktade, på kabinettets undre del var det munstycken med högt arbetstryck som var mest effektiva. Den mest gynnsamma placeringen var dock den på toppen. Munstycken med stor spridningsvinkel och högt vattentryck fungerade bäst då de var monterade på framsidan av kabinettet. Det finns dock praktiska problem med en sådan montering.

Man provade även funktionen hos kretskorten. När vatten påfördes bröts spänningen. Alla kretsar var fullt funktionsdugliga så snart utrustningen fått torka upp.

## 5.4.2 Skydd av datorkabinett

National Institute of Standards and Technology (NIST) i USA har också undersökt möjligheterna att använda vattendimma för skydd av datorutrustning [53, 54]. Man byggde ett mindre kabinett, 500 mm gånger 200 mm gånger 400 mm (höjd) med ett antal vertikala ”kretskort” i aluminium. Avstånden mellan korten var antingen 25 mm eller 50 mm. Det brännbara materialet utgjordes av en vertikal, 3 mm tjock skiva av PMMA som centrerades mellan kretskorten. Som tändkälla användes en minde gasbrännare. Skivan med PMMA flyttas runt till olika positioner i kabinettet under försöksserien för att avgöra var släckning kunde erhållas. Tre fläktar i botten av kabinettet användes för att simulera ett flöde av kylluft.

De parametrar som studerades var släcksystemets effektivitet med avseende på val av munstycken, placering av brandkälla relativt placering av munstycke, vattenflöde och till vilken grad branden var dold av kretskorten.

Man använde fyra stycken olika typer av munstycken (dock endast en typ åt gången), två olika munstycken för hydraulisk sönderdelning (flöde mellan 0,3 - 1,9 L/min och 0,76 - 4,4 L/min) och två olika med pneumatisk (tryckluft) sönderdelning (vattenflöde mellan 3 - 9 L/min).

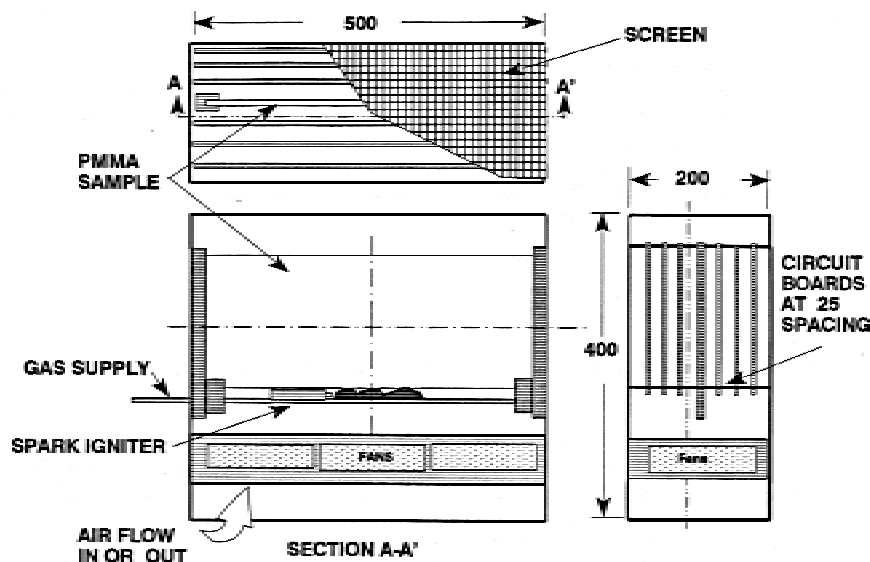
Den första försöksserien genomfördes med den kvadratiske (200 mm sida) PMMA skivan helt exponerad (inga obstruktioner). Avsikten vara att se om vattensprayen från de olika munstyckena var tillräcklig för att släcka branden.

Försöken visade att resultaten med de hydrauliska munstyckena varierade avsevärt med munstyckstrycket. Fyra olika tryck användes 14, 27, 41 och 55 bar. Vattnets förmåga att tränga ned till branden var mycket begränsad vid det lägsta trycket. Vid högre tryck fylldes nästan hela kabinettet av vattendimma och branden i PMMA skivan släcktes i de allra flesta positioner.

Munstyckena med pneumatisk sönderdelning av vattnet var inte lika effektiva som de som hydrauliskt sönderdelade vattnet. Detta berodde på skillnader i spridningsbild.

I den andra försöksserien monterades PMMA skivan vertikalt mellan ”kretskorten” i kabinettet. Ett munstycke placerades på utsidan kabinettet, strax över dess topp. Mängder med olika försöksparametrar undersöktes, såsom avståndet mellan munstycket och branden (mellan 0,5 till 1,5 m), avståndet från kabinettets centrumlinje till munstycket, ventilationen i kabinettet och placeringen av PMMA skivan.

I denna försöksserie användes enbart munstycken som hydrauliskt sönderdelade vattnet eftersom dessa bedömdes vara bäst i den första försöksserien.



Figur 9 I den andra försöksserien som genomfördes av NIST monterades en vertikal skiva av PMMA (brandkälla) mellan "kretskorten" i ett datorkabinettet.

Av sammanlagt 93 försök var 65 lyckade så till vida att branden släcktes. Den försökssparameter som hade störst inverkan på resultatet var brandkällans avstånd till centrumlinjen. De parametrar som hade liten inverkan på resultatet var avståndet mellan "kretskorten" och graden av ventilation. Resultaten från de två försöksserierna kan sammanfattas med; förmågan för ett munstycke som producerar små vattendroppar att effektivt släcka brand är:

- Graden av obstruktioner mellan munstycket och branden.
- Det horisontella avståndet mellan branden och den högsta koncentrationen av vattendroppar i vattensprayen.
- Vattentrycket, eller mer precist munstyckets pentrationskraft.

Slutsatsen är att vattenspray- eller system med vattendimma liknande det som provats, med munstycken placerade utanför datorkabinettet, sannolikt inte är tillnärmelsevis lika effektiva som ett gassläcksystem.

### 5.4.3 Skydd av kabinett med elektronik och i övergolv

National Fire Laboratory vid National Council Canada (NRC) har genomfört [55] en serie om 92 experiment för att undersöka möjligheterna för vattendimma att kontrollera eller släcka brand i kabinett med elektronik och i ett övergolv med kablar.

Vid försöken användes en utrustning med ”överhettat vatten” som snabbt strömmar ut genom ett eller flera relativt enkla munstycken. Tekniken bygger på att vatten värms upp till en temperatur som ligger över dess kokpunkt i ett tryckkärl. Eftersom vattnet inte tillåts att expandera bibehålls det i vätskefas. Trycket i kärlet driver ut vattnet till ett rörsystem och eftersom omgivningen håller atmosfärstryck och rumstemperatur förångas en viss mängd av vattnet. Härvid bildas ett ”moln” bestående av en blandning av vattenånga och små vattendroppar. Andelen vattenånga som bildas bestäms i första hand av till vilken temperatur vattnet värmts upp. Exempelvis förångas 14,5 mass-% vatten när vattnet värmts till en initial temperatur om 176°C. I takt med att molnet kyls kommer vattenångan att kondensera till vatten.

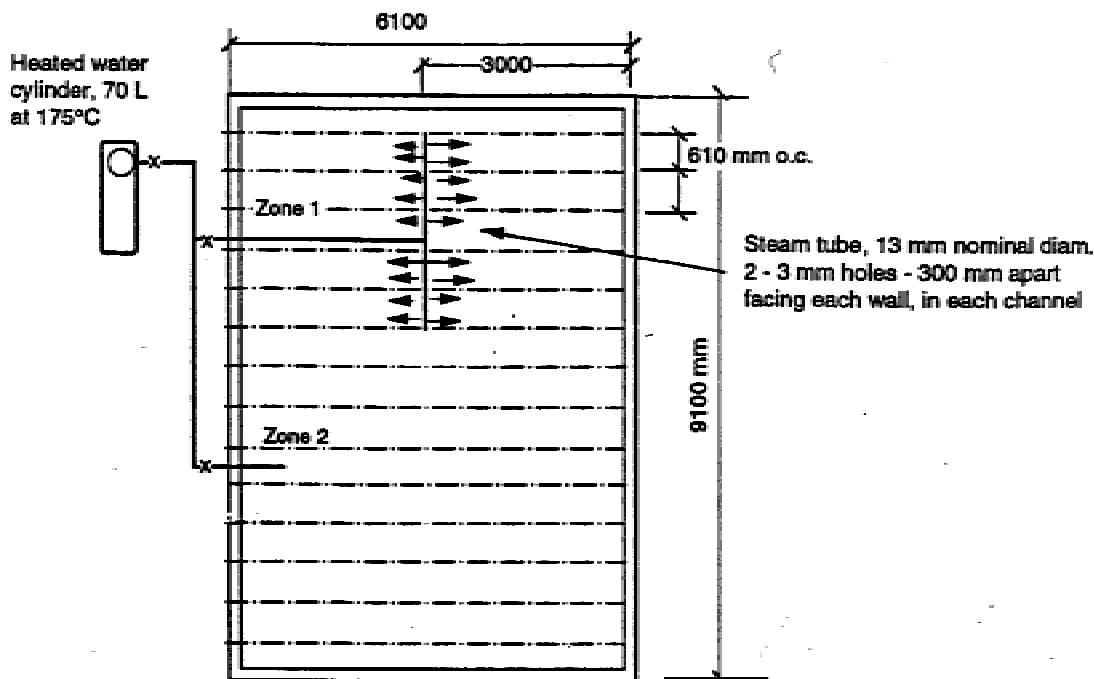
En annan aspekt av tekniken är att ”överhettat vatten” kan distribueras via munstycksöppningar som är betydligt större än gängse munstycken för att producera små vattendroppar. Dessutom är det möjligt att åstadkomma betydligt högre massflöden. Med hjälp av olika utformning av munstycken går det skräddarsy vattensprayen så att den är anpassad till applikationen.

Den första försöksserien genomfördes i ett datorkabinett som var 0,86 m x 0,50 m x 1,60 m (höjd). Branden anlades i både verkliga och simulerade kretskort. Flera olika typer av munstycken användes, ett högtrycksmunstycke (34 bar), ett lågtrycksmunstycke (8 bar), ett för pneumatisk (tryckluft) sönderdelning, ett munstycke med spridarplatta och ett 4 mm munstycke för att distribuera det ”överhettade vattnet”. Munstyckena producerade en vattenspray med en spridningsvinkel mellan 60° och 90°.

Resultaten från försöken visade att branden bara var möjlig att släcka när vattensprayen var centrerad över de två brinnande kretskorten. Ökat vattentryck eller vattenflöde förändrade inte effektiviteten för det enskilda munstycket. Det enskilda munstycket för det ”överhettade vattnet” var inte mer effektivt än de övriga munstyckena. Det var uppenbart att små vattendroppar och vattenånga producerades eftersom moln av vattenånga trängde ut genom kabinettets öppningar, något som inte inträffade med de konventionella munstyckena. Mängden vattenånga klarade dock inte av att släcka några bränder om bränderna var utanför själva sprayen. Detta talar för att släckeffektiviteten till största delen beror på direkt vätning och kylning. För att undersöka till vilken grad systemet klarade att sänka syrekoncentrationen i kabinettet, genom att tränga undan frisk luft, genomfördes sådana mätningar. Det visade sig dock att syrekoncentrationen inte förändrade sig nämnvärt. Det beror sannolikt på att omgivande luft trängde in i kabinettet och att vattenångan kylades av så att vatten kondenserade ut. Potentialen för ångsläckning är högre vid högre temperaturer (över 60°C) eftersom luftens förmåga att bära vattenånga ökar med ökad lufttemperatur.

Försök genomfördes även i en uppställning där ett övergolv med kablar efterliknades. Övergolvet var 9 m långt, 6 m brett och hade en höjd om 0,6 m och byggdes upp med träreglar, träbalkar och 20 mm plywood. Både ett mer konventionellt system med vattenspraymunstycken och systemet med ”överhettat vatten” provades. Övergolvet ventilerades med en fläkt så att en luftomsättning om antingen 0, 15 eller 25 omsättningar per timme åstadkoms.

Systemet med "överhettat vatten" bestod av två 3 m långa rör med 13 mm diameter som monterades längs övergolvet mittlinje. Två 3 mm hål borrades parvis på ömse sidor av röret varje 0,3 m. På så vis distribuerades vattendimma åt motsatta håll, mot respektive långsida. Försöksuppställningen visas i nedanstående figur.



Figur 10 Försöksuppställning vid försöken i övergolv som genomfördes av National Fire Laboratory i Kanada med "överhettat vatten".

Vattenmängden mättes med mätkärl på golvet och varierade med avståndet från röret, från 2,5 L/min/m<sup>2</sup> precis under röret, till cirka 5,5 L/min/m<sup>2</sup> en meter bort till cirka 1,2 L/min/m<sup>2</sup> på 3 m avstånd (vid väggen). Vattentätheten för det konventionella systemet var jämförbar.

Branden initierades i ett knippe om 25 stycken plastisolerade kablar som virades runt ett rep (hampa) indränkt i dieseloilja. Avsikten var att skapa en glödbland i kablarna som underhölls av det brinnande repet.

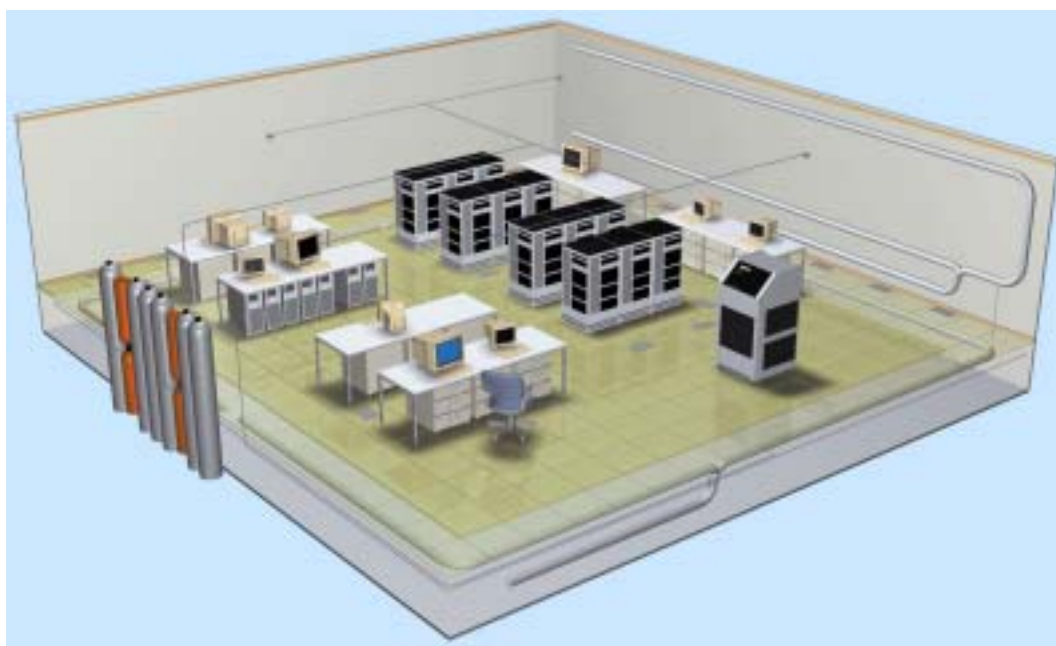
Denna brandkälla placerades i olika positioner av övergolvet. Branden släcktes normalt efter mellan 20 till 60 sekunder inom de ytor där vattentätheten var mellan 2 till 3 L/min/m<sup>2</sup>. När vattentätheten var lägre än 1 L/min/m<sup>2</sup> släcktes branden inte trots att systemet med "överhettat vatten" skapade ett moln av vattenånga som fyllde hela utrymmet. Det visar att återigen att det krävs direkt kylning och vätning för att släcka glödblanderna. Generellt var det konventionella systemet mer effektivt än systemet med "överhettat vatten". Det berodde primärt på att vattensprayen från det konventionella systemet koncentrerades till väl definierade ytor, medan vattnet från systemet med "överhettat vatten" spred vattnet över en större area, men med en vattentäthet som i många fall alltså var allt för låg.

#### 5.4.4 Släckning och rökgastvätning i datorhallar

Marioff Corporation Oy i Finland har utvecklat [56] ett system som både tvättar rökgaser och släcker bränder i datorhallar. Vid brand i PVC, som är ett vanligt isolermaterial för elkablar, bildas väteklorid, HCl, vilket är starkt korrosivt. Om koncentrationen av kloridjoner på ett kretskort överstiger  $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  krävs sanering. Den övre gränsen där sanering är möjlig ligger omkring  $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ .

Det system som utvecklats och patenterats av Marioff Corporation Oy bygger på att (1) rökgaser ventileras bort, (2) att de tvättas och (3) att branden släcks. Systemet består av en serie med ventilationskanaler försedda med vattenspraymunstycken. Kanalerna är försedda med hål placerade med jämna mellanrum. Eftersom en vattenspray injekterar luft skapas ett ventilationsflöde i kanalerna. Rök sugas in och tvättas av vattnet. Det förorenade vattnet samlas upp i ett uppsamlingskärl placerat i ventilationskanalernas lågpunkt.

Munstyckena är via ett rörsystem och en ventil kopplade till tryckkärl med vatten och med kvävgas. Här blandas vatten med kvävgas. Det är alltså en blandning av vatten och kvävgas som distribueras via rörsystemet fram till munstyckena. Under den första delen av utströmningsfasen är förhållandet vatten-kvävgas högt, vilket ger en bra tvätteffekt av rökgaser. Under den andra delen av utströmningen är detta förhållande betydligt lägre, vilket skapar en fin dimma av små vattendroppar. Under denna del strömmar kvävgas tillsammans med vattendimma ut från ventilationskanalerna. Det är i huvudsak under denna utströmning som släckning av brand åstadkoms, men det går inte att säga generellt. Ibland sker släckning redan under "röktvättfasen" och rök tvättas under släckningsfasen.



Figur 11 System utvecklat speciellt för datorhallar.

Vatten behövs alltså både för att tvätta rökgaserna och som släckmedel. Kvävgasen sönderdelar vattnet till små vattendroppar och fungerar som släckmedel. Det ventilationsflöde som skapas under installationsgolvet bidrar till att koncentrationen av "släckmedel" bibehålls och det är skorstenseffekten som skapas i datorkabinetten som får blandningen av vattendimma och kvävgas att stiga uppåt och släcka bränder.

Marioff Corporation Oy har sålt 800 system [57] för datorhallar sedan 1996, i första hand i Sverige och övriga Skandinavien. För att komma in på den amerikanska marknaden krävs i allmänhet någon slags godkännande och efter en omfattande serie försök har man ansökt om godkännande från Factory Mutual för installationsgolv. Enligt uppgift kommer systemet att vara ”moduluppbyggt” och det kommer inte att finnas någon begränsning vad gäller det skyddade installationsgolvet volym.

#### 5.4.5 Skydd av renrum i halvledarindustrin

Bränder i renrum inom halvledarindustrin är mycket kostsamma. För att förhindra att känslig elektronik kontamineras av rökgaser krävs snabb detektering och snabb släckning av de bränder som kan uppstå. Factory Mutual Research Corporation (FMRC) är en av de som har jobbat [58] med problematiken.

I renrummen finns till exempel utrustning för tvättning av elektronik så kallade ”wet benches”. Dessa är utförda antingen av icke flammskyddsbehandlad polypropen eller polypropen som är flammskyddsbehandlad.

För att studera brandtillväxt i en ”wet bench” genomfördes fribrinnande försök under en kalorimeter. Utrustningen var 1,8 m lång och vägde cirka 280 kg. Branden initierades med åtta stycken glödstick och tiden till antändning var mindre än 30 sekunder. Därefter utvecklades branden långsamt under tio minuter, varefter den snabbt accelererade, vilket fick hela utrustningen att kollapsa och smälta samman till en poolbrand på bara tre minuter. Brandeffekten var som mest 10 MW.

För att undersöka olika skyddskoncept byggdes ett rum med dimensioner som ett verkligt renrum. Rummet var 3,7 m brett, 5,5 m långt och 3,7 m högt. Tak och golv byggdes av perforerad plåt och försågs med fläktar för att åstadkomma det nedåtriktade luftflöde som finns i rummen. En konventionell ”wet bench” utförd av flammskyddsbehandlad polypropen placerades nära ett av rummets långsidor. Utrustningen försågs med en separat frånluftsfläkt och instrumenterades med termoelement, mätutrustning för optisk siktlängd, etc. Som brandkälla användes antingen en poolbrand av polypropen eller olika typer av brännbara vätskor. Isopropylalkohol (IPA) är vanligt förekommande för tvättning av elektronik och dessutom användes heptan på grund av dess höga avbrinningshastighet och aceton på grund av dess låga flampunkt.

Munstycken installerades i själva utrustningen och brandförsök gjordes med branden placerad antingen 60 cm eller 90 cm (vertikalt avstånd) från munstyckena. Systemet aktiverades manuellt och försök gjordes med de olika typerna av brännbara vätskor, olika storlek på poolbrandens balja och med olika placering relativt munstyckena. Resultaten var mycket lyckade och i samtliga fall var släcktiderna kortare än 43 sekunder och de optiska mätningarna visade att röken från bränderna vädrades bort av ventilations-systemet på cirka 10 sekunder. Försöken visade att de olika brännbara vätskorna var svårare att släcka än branden i polypropen.

Som diskuteras i kapitel 3.4 har FMRC tagit fram installationsanvisningar och en provningsmetod för system med vattendimma tänkta för installation i renrum.



## 5.5 Transport, fordon, tåg och flygplan

### 5.5.1 Släcksystem för transportvagnar i Eurotunneln

Den 18 november 1996 utbröt [59, 60] en allvarlig brand ombord på en av de transportvagnar som transporterar lastbilar och andra tunga fordon i Eurotunneln under den Engelska kanalen. Branden varade i omkring sju timmar och involverade totalt tio lastbilar. Lyckligtvis omkom inga människor vid branden. Brandskadekostnaderna och de kostnader som stilleståndet kostade har uppskattats till £200 miljoner. Mot bakgrund av detta initierades därför en studie för att undersöka möjligheten att installera någon form av fast släcksystem i tunnlarna. Ett alternativ som diskuterades var att installera ett fast system i tunneltaket, ungefär var 5:e kilometer. Av flera praktiska skäl visade sig ett sådant alternativ vara svårt på grund av att:

- Transportvagnarnas konstruktion är relativt tät med ”halvöppna” sidor och tätt tak. Vatten från sprinkler skulle alltså ha svårt att nå själva branden.
- Positionen på den vagn där branden startat behöver bestämmas med rätt stor noggrannhet, eftersom ett helt tågset är cirka 750 m långt och det är orimligt med en sprinklersektion som är så lång.
- Släckning eller dämpning av branden kan inte påbörjas förrän tåget färdats upp till 5 km.
- Installationsarbetet skulle störa den normala driften i tunneln.

Istället beslutade man att överväga installation av branddetektion och ett släcksystem på varje transportvagn. Den primära målsättningen med en sådan lösning skulle vara att minska skadorna på tunnelkonstruktionen vid en brand. Man formulerade följande principiella lösning:

- Varje transportvagn förses med en matris av IR-detektorer, kapabla att detektera en brand om cirka 500 kW under de betingelser som råder vid färd.
- Varje transportvagn förses med en matris av vattenspraymunstycken eventuellt kompletterat med ytterligare munstycken vid speciella riskområden, såsom lastbilens bränsletank eller förarhytt.
- Vattentryck omkring 3 - 5 bar med vattendroppar i storleksordningen 200 - 300  $\mu\text{m}$ .
- Totalt vattenflöde på omkring 1000 L/min. Tillräckligt för att åstadkomma en vattentäthet runt 5 L/min/m<sup>2</sup> om brandens yta är omkring 200 m<sup>2</sup> (alltså en brinnande lastbil).
- Vatten transporteras i en vattentank rymmande 40 000 L, tillräcklig för att klara ovanstående vattenflöde i upp till 40 minuter.
- Systemet måste klara att dämpa en brand vid de lufthastigheter på omkring 5 m/s som råder när tågsetet helt har stannat.

- Under optimala betingelser, alltså när tåget står på station, skall systemet klara att dämpa en brand upp till 5 MW, vilket medger viss brandtillväxt från det att branden detekterats tills dess att vattenspraysystemet aktiverats.

Tidig aktivering av en brand är en viktig förutsättning för att dämpa eller släcka en brand. Hög känslighet hos detektionssystemet kan ofta medföra högre risk för fellarm. Målsättningen med systemet är att det skall klara att detektera en brand mellan 500 kW och 2 MW, vilket exkluderar många traditionella detektionssystem eftersom de inte är känsliga nog.

Det detektionssystem som man valde att studera består av IR-detektorer, jämt fördelade över transportvagnen och riktade mot de fordon som transporteras. Detektorerna larmar om temperaturen stiger över en nivå som är 45°C över omgivningens eller om temperaturstegringen överskrider 0,15°C/s. En komplikation vid detektering av brand är de höga lufthastigheter, ungefär 20 m/s, som råder vid drift.

Som beskrivs ovan ingick det i konceptet att varje transportvagn förses med en matris av vattenspraymunstycken, 12 stycken per sida, alltså totalt 24 stycken munstycken. Munstyckena placeras så att en så jämn distribution som möjligt åstadkoms. Varje transportvagn är cirka 19,3 m lång, 3,7 m bred och 4,4 m hög. Det totala vattenflödet är cirka 1000 L/min, alltså 500 L/min per sida och 42 L/min per munstycke. Transportvagnarna är inte slutna utan till cirka 50 % öppna och det finns inga dörrar i dess ändar. Det är alltså inte möjligt att släcka genom att syrekoncentrationen sänks. Konceptförslaget skickades till ett antal potentiella leverantörer av vattenbaserade släcksystem. Av de tio som svarade föreslog sju system med vattendimma och de övriga tre mer traditionella, sprinklerliknande lösningar.

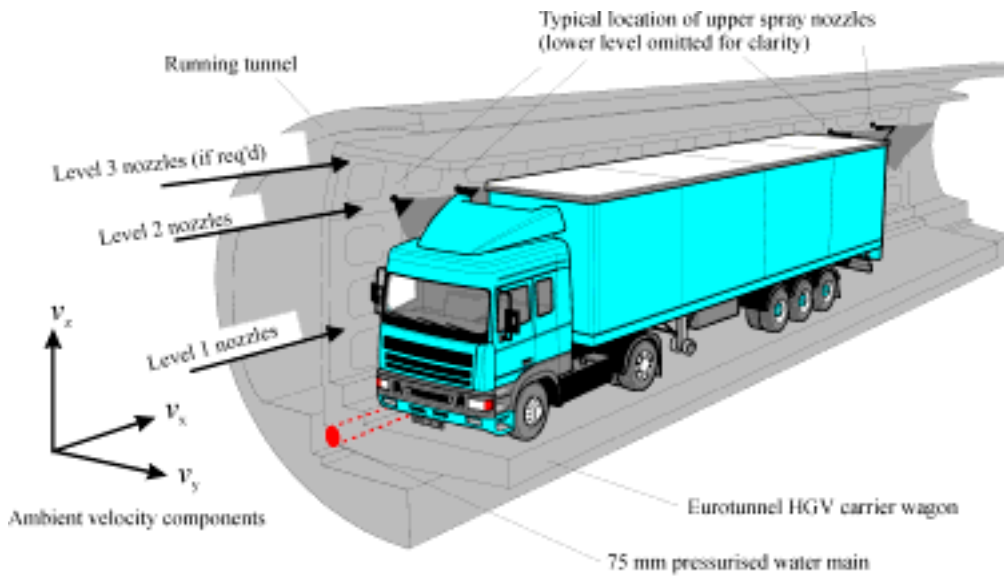
En förstudie initierades för att bedöma vilken av de två olika lösningarna som mest sannolikt skulle ha en möjlighet att fungera. Slutsatsen blev att ett mer konventionellt system med relativt stora vattendroppar troligen har bäst förutsättningar att nå fram till branden när omgivande lufthastighet är omkring 5 m/s. Men om ett system med mindre vattendroppar klarar dessa lufthastigheter bedömdes det som troligt att kunna reducera vattenbehovet och systemets totalvikt. Man tog därför beslutet att genomföra fullskaliga brandförsök med båda typerna av system. Försöken hade följande målsättning:

- Att verifiera att det föreslagna detektionssystemet klarar att detektera en brand tillräckligt tidigt för att släcksystemet skall klara att hantera branden.
- Att prova de två släcksystemen i en miljö liknande den som råder ombord på ett transporttåg under drift.
- Att optimera systemlösningarna.

Eftersom flera transportvagnar var ur funktion efter branden 1996 föll det sig naturligt att använda dessa vid försöken. En kritisk punkt vid försöken var möjligheterna att simulera de lufthastigheter på upp till 20 - 24 m/s som råder runt vagnen vid drift. Behovet var störst för utvärderingen av detektionssystemet eftersom släcksystemet används när tågsetet hunnit sakta ned och stannat vilket innebär lufthastigheter omkring 5 - 10 m/s. En godtagbar kompromiss var att bygga ett halvt tvärsnitt av en tunnel och en transportvagn. Tunneln var cirka 38 m lång. Med hjälp av fläktar vid den ena mynningen gick det att åstadkomma önskat luftflöde.

En lastbilmodell byggdes och som gods användes det standardplastgods, EUR Standard Plastic, som är utvecklat av SP Brandteknik alternativt tomma, staplade trälastpallar.

Totalt genomfördes 18 försök och ett system med högt arbetstryck (80 - 100 bar) och ett med lågt tryck (2 - 7 bar) jämfördes.



Figur 12 Principiell utformning av skyddet av transportvagnar i Eurotunneln.

För systemet med lågt arbetstryck användes även ett Klass A skum. Systemens effektivitet bedömdes baserat på brandskadorna, alltså hur mycket gods som förbrukades under normalt 30 minuters varaktighet, uppmätta temperaturer, etc. Baserat på försöken kunde man dra nedanstående slutsatser:

- Projektet visade att det är möjligt att skydda de transportvagnar som transporterar lastbilar och andra tunga fordon i Eurotunneln med ett fast installerat system för detektion och kontroll av brand. Försöken visade att det är möjligt att förhindra brandspridningen från ett fordon till ett annat.
- Av de två olika släcksystem som utvärderades var det något överraskande det med högst arbetstryck och minsta vattendroppar som var mest effektivt, både vad gäller förmågan att begränsa brandskadorna och att reducera temperaturerna, jämfört med lågtryckssystemet.
- Det är troligt att de mindre vattendroppar ( $< 100 \mu\text{m}$ ) ger en fördel vad gäller kylning av brandgaserna eftersom mindre vattendroppar förångas snabbt. Ventilationsflödet med de lufthastigheter som är aktuella verkar inte vara något problem.
- Vattenflödet för högtryckssystemet var mellan 300 - 320 L/min, lågtryckssystemet krävde ett minsta flöde om 500 L/min. (Dessa siffror avser en halv transportvagn).
- Det brandscenario som var svårast för både de provade systemen var när tändning skedde inne i själva lasten. Branden hinner utvecklas innan lastbilens sidor brinner bort och tillåter vatten att nå branden. Solida sidor försämrar situationen jämfört med sidor av kapellväv.
- Dämpning av branden är trolig när den initiala branden är utanför lastbilens last. Även i detta fall var högtryckssystemet mer effektivt.

## 5.5.2 Flygplanskabiner

Sedan 1989 har den amerikanska luftfartsmyndigheten U.S. Federal Aviation Administration (FAA) tillsammans med dess brittiska motsvarighet, British Civil Aviation Authority (CAA) varit involverade [61, 62, 63] i utvecklingen av ett effektivt och praktiskt användbart system med vattendimma för flygplanskabiner. Systemet skall i första hand dämpa, inte släcka en brand, för att skydda passagerarna vid utrymning efter en krasch.

Vid de flygplansolyckor där passagerare inte omkommer vid själva kraschen är den vanligaste dödsorsaken brand. Bränder uppstår nästan alltid på grund av att utläckande flygbränsle utanför flygplanskroppen antänds. Möjligheterna för överlevnad i kabinen beror på hur snabbt branden sprids till kabinen och tiden till övertändning. Brandspridningen är beroende av hur allvarligt flygplanskroppen skadas vid olyckan, om dörrarna öppnas, avståndet till spillbranden och om det skapas ett drag i kabinen eller ej. Brandegenskaperna hos inredningsmaterialet har också stor inverkan.

Fullskaleförsök som genomförts av FAA och CAA i både en smal och en bredare flygplanskropp visar att ett system med vattendimma reducerar påverkan från en yttre brand i kabinen. Mest anmärkningsvärt är att lufttemperaturen reduceras kraftigt och att koncentrationen av vattenlösliga gaser minskar. Även koncentrationen av koldioxid reduceras. Genom att förhindra övertändning ökar tiden för överlevnad med 2 - 3 minuter, vilket är mycket i ett sammanhang där förbättringar i storleksordningen 5 - 10 sekunder skulle kunna rädda många liv. En viss nackdel kan skönjas vad gäller systemets tendens att sänka rökgaslagret under det tidiga skedet av brandförloppet, vilket reducerar siktlängden. Men allt eftersom branden dämpas så förbättras siktlängden jämfört med förhållandena utan systemet. Genom att dela upp systemet i sektioner kan man minska nackdelarna med reducerad sikt och sänka det totala vattenbehovet och därmed systemets totalvikt. Nedanstående tabell [64] visar det ungefärliga vattenbehovet för ett antal olika flygplanstyper beroende på systemlösning.

För att uppskatta nyttan med systemet analyserade man flygplansolyckor från de senaste 20 åren. På detta sätt kunde man beräkna hur många personer som potentiellt skulle kunna räddas om alla passagerarplan utrustas med systemet. Man uppskattade att 14 liv per år, sett över hela världen skulle kunna räddas varav 4 personer i USA. Trots att detta är låga siffror finns möjligheten att rädda ett stort antal människor vid en större olycka. En kostnadsanalys visade att varje räddat människoliv skulle kosta i storleksordningen 22 - 23 miljoner US dollar. I senare studier [65] har man uppskattat att antalet räddade liv skulle vara 6 per år.

Tabell 15 Vattenbehov för olika flygplanstyper baserat på hur släcksystemet utformas.

Flygplanstyp	Vattenbehov [L]		
	Alla munstycken i kabinen aktiveras. En enda vattenkälla med 3 minuters varaktighet.	Tre sektioner. Vattenkälla för 3 minuters varaktighet för en 6 m lång sektion.	”Single Failure Survival”. Vattenkälla för 3 minuters varaktighet för en 6 m lång sektion.***
737-400	162	108	72
757-200	216	108	72
767-200	247,5	135	90
747-400	585	144*	96**
A320-200	162	108	72
A310-200	297	162	108
A300-600	351	162	108
MD-81	180	108	72
MD-11	405	162	108

\* En sektion på nedre plan och en sektion på övre.

\*\* En sektion på nedre plan.

\*\*\* Matning av vatten från båda ändar medger att flygplanskroppen (och systemet) kan brytas i en punkt utan att systemets funktion påverkas.

Trots omfattande forskning har inga system installerats i praktiken. Det finns flera orsaker. Den främsta är att luftfartsmyndigheterna inte ställer några sådana krav. Framst för att man inte bedömer att kostnaderna motsvarar den förväntade nyttan, att inredningsmaterialen blivit bättre, vilket minskar risken för brand och att möjligheterna att utrymma ökat. Den andra beror på konkurrenssituationen flygbolagen emellan som inte medger de ökade kostnader som systemen innebär. Ett skäl, förutom en större olycka, som skulle kunna påskynda användningen vore utvecklingen av passagerarplan för 600 - 800 passagerare och dessa flygplans problem med utrymning. Ett annat att något flygbolag vill profilera sig mot sina kunder med ökad säkerhet som ett försäljningsargument.

## 6 Förslag till fortsatta insatser

Som framgår av rapporten finns oerhört mycket gjort inom området och det står helt klart att system med vattendimma är ett användbart alternativ för många olika tillämpningar. Det finns dock områden där man bör gå vidare, se nedan.

### 6.1 Beräkningsmodell

Principen för släckning förefaller enkel men när man börjar studera de mer grundläggande orsakerna till varför vattendimma generellt (eller en specifik tillämpning) fungerar bra i vissa sammanhang men sämre i andra, kan det ibland visa sig svårt att utreda orsaken. Skälet till detta är att de fysikaliska principer som gör metoden effektiv för en typ av brand kan vara till nackdel i ett annat fall. Exempelvis vill man vid en oljebrand i ett maskinrum sänka rökgasernas temperatur och reducera syrenehållet i luften. Detta gör man effektivast med en stor mängd små droppar som dels är effektiva strålningsabsorbenter, dels har en stor yta per liter vatten vilket ger hög förångningss hastighet och därmed snabbt sänker syrehalt och temperatur.

Skulle det istället vara en brand i ett fast material man vill släcka har man behov av större vattendroppar vilka kan passera genom brandplymen och flamzonen för att kyla bränslet. För fallet med oljebranden har man även behov av att åstadkomma en god omblandning av gaserna i rummet så att vattendropparna kan göra nytta där de bäst behövs och även transporteras till dolda brandområden. Detta kräver ett visst mått av rörelsemängd hos vattnet vilket lättast åstadkoms med större droppar, vilket alltså kontrasterar mot den tidigare nämnda droppstorleken. Ett annat problem är de skalningseffekter som uppstår då olika rumsvolymer skall skyddas med ett vattendimmsystem. Ett släcksystem av en viss typ kan fungera bra för ett rum och en viss brandstorlek men det är inte säkert att en dubbelt så stor volym kan skyddas med ett ”dubbelt så stort” släcksystem av samma typ.

Det finns därför ett behov att utveckla en beräkningsmodell utformad så att lämpliga mått för att karakterisera vattendimman kan användas som indata (droppstorleksfördelning, vattenflöde, tryck, etc.), som tillsammans med brandeffekt (MW) och typ, samt rumsvolym med tillhörande randvillkor, inklusive ventilation. En sådan modell bör kunna användas för att utifrån en viss typ av brand avgöra hur ett släcksystem baserat på vattendimma skall vara utformat för att ge bästa möjliga skydd.

### 6.2 Verifierande försök

I en förlängning bör den beräkningsmodell som beskrivs ovan verifieras. Detta kan göras mot såväl försök som utförts tidigare som med väl definierade och dokumenterade nya försök.

Nya försök bör instrumenteras för att mäta vattendroppstorlek, viktminskning hos brandkälla, in- och utströmning genom öppningar, temperaturer i olika positioner, etc.

## Referenser

- 1 Back, Gerard G., "1995 Progress Report: Water Mist Fire Suppression System Technologies", SFPE Bulletin, Fall 1995
- 2 Pepi, Jerome S., "Water Mist Fire Protection Systems Come of Age", Grinnell Corporation, USA, July 2, 1996
- 3 Mawhinney J.R., Dlugogorski B.Z. and Kim A.K., "A Closer Look at the Fire Extinguishing Properties of Water Mist"
- 4 Coulson J.M. and Richardson F.F, "Chemical Engineering", Vol I, Pergamon Press Ltd, 1984
- 5 Grant G., Brenton J. and Drysdale D., "Fire suppression by water sprays", Progress in Energy and Combustion Science, 26, pp 79-130, 2000
- 6 Fan L-S. and Zhu C., "Principles of Gas-Solid Flows", Cambridge University Press, 1998
- 7 Ndubizu C.C., Ananth R., Tatem P.A. and Motevalli V. "On water mist fire suppression mechanisms in a gaseous diffusion flame", Fire Safety Journal 31, pp 253-276, 1998
- 8 Back G.G., Craig L.B. and Hansen R., " A quasi-steady-state model for predicting fire suppression in spaces protected by water mist systems", Fire Safety Journal, 35, pp 327-362, 2000
- 9 Liu L. and Kim A.K., "A Review of Water Mist Fire Suppression Systems– Fundamental Studies", Journal of Fire Protection. Engineering, Volume 10 (3), pp 32-50, 2000
- 10 Pepi J. S. "Water Mist Fire Protection –When Less Is Better"
- 11 Jones A and Nolan P.F., "Discussion on the use of fine water sprays or mists for fire suppression", J. Loss Prev. Process Ind., Volume 8 (1), pp 17-22, 1995
- 12 Mawhinney, Jack R., "Design of Water Mist Fire Suppression Systems for Shipboard Enclosures", föredrag vid International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems, November 4 -5, 1993, Borås, Sweden
- 13 Test report 97R30841, "Machinery Space Fire Tests for Grinnell Fire Protection using *AquaMist* AM4 Nozzles, Swedish National Testing and Research Institute, October 1997 (proprietary)
- 14 "Evaluation of Temper-S and Temper-SX antifreeze for wet-pipe sprinkler systems using heat release rate calorimetry", SP Report P00 7275, 2000-10-12 (proprietary)
- 15 "Fire tests in small machinery spaces using the Ultra Fog fire protection system", SP Report 98R3 1049, 1999-05-12 (proprietary)
- 16 Finnerty, Anthony, "Water-Based Fire-Extinguishing Agents", proceedings from Halon Options Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, USA, 1995

- 17 Mawhinney, J. R. and DiNenno, P. J., "Potential effects of water mist fire suppression systems characteristics of water mist systems", EPA Health Panel, 1994
- 18 "Water mist fire suppression systems, health hazard evaluation", EPA water mist health panel, 1995
- 19 Arvidson, Magnus och Månsson, Margret, "Utvärdering av olika frysskyddsmedel för sprinklersystem, Brandforsk projekt 631-961", SP Rapport 1999:08, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Borås, 1999
- 20 "Svenskutvecklat frysskyddsmedel för sprinklersystem klarar temperaturer ned till -30 °C", artikel i BrandPosten nr 23, december 2000
- 21 Resolution A.800(19), "Revised guidelines for approval of sprinkler systems equivalent to that referred to in SOLAS Regulation II-2/12", International Maritime Organisation, London, UK, December 14, 1995
- 22 Arvidson, Magnus and Isaksson, Sören, "Equivalency Sprinkler Fire Tests, Nordtest Project 1152-94, SP-Report 1995:19, Swedish National Testing and Research Institute, Borås, Sweden, 1995
- 23 Arvidson, Magnus, Isaksson, Sören and Tuomisaari, Maarit, "Recommended Acceptance Criteria for Sprinkler Systems Equivalent to SOLAS II-2/12", SP-Report 1995:20, Swedish National Testing and Research Institute, Borås, Sweden, 1995
- 24 IMO MSC/Circ. 668, "Alternative arrangements for halon fire-extinguishing systems in machinery spaces and pump-rooms", International Maritime Organization, London, UK, December 30, 1994
- 25 IMO MSC/Circ. 728, "Revised test method for equivalent water-based fire-extinguishing systems for machinery spaces of Category A and cargo pump-rooms contained in MSC/Circ.668", International Maritime Organization, London, UK, June 4, 1996
- 26 IMO MS/Circ. 913, "Guidelines for the approval of fixed water-based local application fire-fighting systems for use in category A machinery spaces", International Maritime Organization, London, UK, June 4, 1999
- 27 "Proposed First Edition of the Standard for Water Mist Nozzles for Fire-Protection Service, UL 2167", Underwriters Laboratories Inc., IL, USA, August 31, 1998
- 28 "Draft Performance Requirements for Water Mist Systems for the Protection of Industrial Oil Cookers", Factory Mutual Research Corporation, USA, November 1999
- 29 Australian Standard™, "Water mist fire protection systems - System design, installation and commissioning", AS4587 - 1999, Standards Australia, 1 The Crescent, Homebush, NSW 2140, ISBN 0 7337 2789 1, Australien, 1999
- 30 Darwin, Robert L., "Water Mist Systems for US Navy Ships", proceedings from Halon Options Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, USA, 1997



- 31 Darwin, Robert L. and Williams, Frederick W., "Overview of the Development of Water-Mist Systems for US Navy Ships", proceedings from Halon Options Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, USA, 1999
- 32 Buckley, Clive and Rush, David, "Water Mist Developments for the Royal Navy", proceedings from Halon Options Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, USA, 1999
- 33 Edwards, Mike and Watkins, Steve, "Further Evaluation of Water Mist for the Royal Navy", proceedings from Halon Options Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, USA, 1997
- 34 Edwards, Mike and Glockling, James, "Low-Pressure Water Mist, Fine Water Spray, Water Source, and Additives: Evaluation for the Royal Navy, proceedings from Halon Options Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, USA, 1999
- 35 Södergren, Ulf, "Brandsläckning med vattendimma i gasturbininstallationer", föredrag vid Nordisk konferens om vattendimmans användningsområden, Borås, Sverige, 14 - 15 maj, 1997
- 36 Papavergos, Panos G. and Södergren Ulf, "A Status Report on Fire Protection of Enclosed Gas Turbines Using Fine Water Sprays", Reprint from IGTI-Vol. 8, ASME Cogen Turbo Power, Book No. I00348 – 1993, 1993
- 37 Gameiro, Victor, M., "Fine Water Spray Fire Suppression Alternative to Halon 1301 in Gas Turbine Enclosures"
- 38 Wighus, Ragnar, Aune, Petter, Drangsholt Geir and Stensaas, Jan, P., "Full Scale Water Mist Experiments", International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems, November 4 - 5, 1993, Borås, Sweden
- 39 Wighus, Ragnar and Aune, Petter, "Engineering Relations for Water Mist Fire Suppression Systems"
- 40 Kim, Andrew K., Liu, Zhigang and Su, Joseph Z., "Water Mist Fire Suppression using Cycling Discharges", Proceedings from INTERFLAM '99, 1999
- 41 Kim, Andrew K., Liu, Zhigang and Su, Joseph Z., "Examination of the Extinguishment Performance of a Water Mist System Using Continuous and Cycling Discharges", *Fire Technology*, Vol. 35, No. 4, 1999
- 42 Grimm, Wade H., "Memorandum for HQ AFCESA/DF - High Pressure Water Spray Fire Suppression System Evaluation Report", 1994
- 43 "Final Report, Feasibility Study of Water Mist Applications for Residential Fires", Contract No. EMW-93-4247, U.S. Fire Administration, Federal Emergency Management Agency, Emmitsburg, MD, USA, January, 1995
- 44 Bill, Robert G., Jr, Stavrianidis, Paraskevas, Hill, Edward E., Jr and Brown, William R., "Water Mist Fire Protection in Residential Occupancies", Factory Mutual Research, November 1995
- 45 Bill, Robert G. Jr., Ferron, Richard and Braga, Antonio, "Water Mist (Fine Spray) Fire Protection in Light Hazard Occupancies", *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 10(3), 2000, pp 1-22

- 46 "Automatic Sprinkler Performance Tables, 1970 Edition", *Fire Journal*, Juli 1970
- 47 Log, T., Jensen, G. och Helseth, S., "Vanntåke for beskyttelse av stavkirker", foredrag vid Nordisk konferens om vattendimmans användningsområden, Borås, Sverige, 14 - 15 maj, 1997
- 48 Meland, Øystein, Jensen, Geir and Helseth, Sjur, "Water Mist to Protect Wooden Historic Structures", proceedings from Second International Symposium on Fire Protection of Ancient Monuments, Krakow, October 17 - 21, 1994
- 49 Milke, James A., "Comparison of the Performance of Water Mist System Designs for Library Stack Areas", *Journal of Applied Fire Science*, Vol 5(3), 1995 - 96
- 50 Mawhinney, J. R., Soja, E., and Gillespie, R., "Mercury Energy CBD Tunnel Project, New Zealand - Performance Based Fire Testing of a Water Mist Fire Suppression System", Proceedings from INTERFLAM '99, 1999
- 51 Hills, Andrew T., Simpson, Terence and Smith, David P., "Water Mist Fire Protection for Telecommunication Switch Gear and Other Electronic Facilities", Proceedings from NIST Water Mist Fire Suppression Workshop, March 1 - 2, 1993, NISTIR 5207
- 52 Simpson, Terence and Smith, David P., "A Fully Integrated Water Mist Fire Suppression System for Telecommunication and Other Electronics Cabinets", International Conference on Water Mist Fire Suppression Systems, Borås, November 4 - 5, 1993
- 53 Grosshandler, William, Lowe, Darren, Notarianni, Kathy and Rinkinen, William, "Protection of Data Processing Equipment with Fine Water Sprays", NISTIR 5514, Gaithersburg, MA, USA, October 1994
- 54 Grosshandler, William, Lowe, Darren, Notarianni, Kathy and Rinkinen, William, "Suppression within a Simulated Computer Cabinet using an External Water Spray", NIST, Gaithersburg, MA, USA, 1994
- 55 Mawhinney, J. R., Taber, B., Su, J. Z., "The Fire Extinguishing Capability of Mists Generated by Flashing of Super-Heated Water", National Fire Laboratory, Ottawa, Canada
- 56 Tuomisaari, Maarit, "Smoke Scrubbing in a Computer Room", proceedings from Halon Options Technical Working Conference, Albuquerque, New Mexico, USA, 1999
- 57 "US fire tests give confidence in HI-FOG smoke scrubbing", information från hemsidan <http://www.hi-fog.com>, 4 oktober 1999
- 58 Wu, Peter K., Harriman, Robert B., and Taylor, Thomas, "A Water Mist System for Wet Bench Protection", proceedings from NFPRF Fire Suppression & Detection Symposium, Orlando, Florida, February 12 - 14, 1997
- 59 Grant, George and Southwood, Peter, "Development of an Onboard Fire Suppression System for Eurotunnel HGV Shuttle Train", proceedings from INTERFLAM '99, 1999
- 60 Grant, George and Southwood, Peter, "Eurotunnel's Full-scale Fire Suppression Test Programme, proceedings from Tunnel Fires and Escape from Tunnels,

International Conference 5 - 7 May, Lyon, 1999

- 61 Sarkos, C. P., Hill, R. G. and Marker, T. R., "Aircraft Cabin Water Spray System"
- 62 Hill, Richard G., Marker, Timothy R. and Sarkos, Constantine P., "Evaluation and Optimization of an On-board Water Spray Fire Suppression System in Aircraft", proceeding from Water Mist Fire Suppression Workshop, NIST, Gaithersburg, Maryland, USA, March 1 - 2, 1993
- 63 Craig, Yvette, "FAA fires up new airplane in sprinkler tests, System fails to slow blaze", Region - The Press of Atlantic City, December 7, 1989
- 64 Lewis, Richard H, "Aircraft cabin water fire-suppression - where to now?", Fire Prevention 270, June 1994
- 65 "Aviation authority says not to 'costly' sprinklers", Fire and Flammability Bulletin. February, 1994

