

Släcksystem för ubåtar

-Vattendimma

Axel Nordström och Simon Thorvaldsson
BRANDTEKNIK | LTH | LUNDS UNIVERSITET



EXAMENSARBETE
Brandteknik

Släcksystem för ubåtar
-Vattendimma

Axel Nordström och Simon Thorvaldsson

Lund 2023

Släcksystem för ubåtar - vattendimma
Water mist fire protection systems in submarines

Författare/Author: Axel Nordström och Simon Thorvaldsson

Report 5703
ISRN: LUTVDG/TVBB--5703--SE

Antal sidor/ Number of pages: 62 (inklusive bilagor)
Illustrationer: Figur 2.6, Figur 5.1, Figur 5.2 och Figur 5.11 är hämtade från Wikimedia Commons.

Sökord:
Ubåt, vattendimma, krav och regelverk, brandsäkerhet, brandskyddssystem

Keywords:
Submarine, water mist, rules and regulations, fire safety, fire suppression system

Abstract

This report is written on the behalf of SAAB Kockums AB to investigate the feasibility of using water mist fire protection systems on board conventional submarines as an alternative to the traditional solution using Halon 1301. Halon 1301 has since the late eighties been phased out due to environmental concerns. The report studies existing rules and regulations regarding fire safety onboard ships, focusing on water mist and submarines, together with a study of previously conducted studies and experiments. The report also includes basic descriptions of conventional submarines and water mist systems. The study regarding rules and regulations show that civilian merchant shipping and military submarines are in large affected by the same rules, with a few exceptions. The advantage of following the subsequent civilian standards is that certified systems and solutions already exists, and the drawback is that the system may not be as adapted to submarines as may be desired. The study regarding previously conducted tests and experiments clearly shows that water mist is a superior fire suppression system regarding its ability to rapidly cool fire gases and limiting fires without the need for large quantities of water. Its drawbacks are largely connected to “the small-fire syndrome”, the difficulties of full extinguishment of small fires. Water mist, in contrast to fire suppression systems using gas, has difficulties in fully extinguish hidden fires. In summary water mist is a viable replacement to Halon 1301 onboard submarines, provided that it's combined with other systems to mitigate its drawbacks.

© Copyright: Division of Fire Safety Engineering, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2023

Avdelningen för Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2023.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

www.brand.lth.se
Telefon: 046 - 222 73 60

Division of Fire Safety Engineering
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden

www.brand.lth.se
Telephone: +46 46 222 73 60

”In omnia paratus”

Beredd på allt, överallt

Motto för ubåten HMS Sjölejonet av Sjöormen-klass

Förord

Denna rapport utgör ett examensarbete för Brandingenjörsprogrammet vid Avdelningen för brandteknik på Lunds Tekniska Högskola. Arbetet omfattar 22,5 högskolepoäng och rapporten är skriven av Axel Nordström och Simon Thorvaldsson. Arbetet och rapporten har genomförts på uppdrag av riskavdelningen på Saab Kockums AB i Malmö.

Vi är tacksamma för all den hjälp vi har fått ta del av under projektets gång. Vi vill särskilt tacka några personer för deras hjälp.

Stort tack till Haukur Ingason, adj. prof. på LTH och senior forskare på RISE och Magnus Arvidson senior forskare på RISE för deras arbete som handledare åt oss.

Vi vill även rikta ett stort tack till Claude Pagnon Eriksson och Erik Nerhagen på SAAB Kockums AB i Malmö.

Ett tack skall även riktas till Joakim Åström från LTH och Sune Nordberg från Första ubåtsflottiljen.

Sammanfattning

Denna rapport är framtagen på uppdrag av SAAB Kockums AB i syfte att undersöka möjligheten att ersätta Halon 1301 med vattendimma som släcksystem ombord på ubåtar. Halon 1301 har historiskt använts som gassläckmedel ombord på ubåtar på grund av dess goda brandsläckande egenskaper i kombination med att inte vara skadlig för de besättningsmedlemmar som befinner sig i utrymmet.

Det har visat sig att Halon 1301 är mycket miljöfarligt, vilket ledde till att nyinstallationer förbjöds i slutet av 1980-talet. Det i kombination med hårdare regler som ställde krav på sprinkler i boende- och publika utrymmen skapade en marknad för vattendimma.

Vattendimma bygger på samma grundprinciper som ett konventionellt sprinklersystem med undantaget att vattendimman arbetar med ethögt vattentryck eller på annat sätt finfördelar vatten till mycket små droppar. De små dropparna har förmågan att effektivt förångas och kan därav kyla brandgaser utan att det krävs stora mängder vatten. Ubåtar är mycket känsliga för viktökning och ändring av tyngdpunkt, vilket skulle kunna göra vattendimma till ett lämpligt alternativ till Halon 1301.

Utöver känslighet gällande vikt och tyngdpunkt står ubåten för en utmanande miljö, då dess inre är helt inneslutet och fylld med besättning, känslig utrustning och vapen. Den inneslutna miljön medför att ubåten är känslig för tryckförändringar vilket ställer krav på de släcksystem som används.

För att undersöka om system med vattendimma är användbara på ubåtar har studier om de krav och regelverk som ställs på ubåtsverksamhet genomförts. Rapporten studerar även relevanta tidigare försök och ger förslag till tänkbara lösningar utifrån kravnivån och framtida forskning.

Studien kring krav och regelverk visar att de krav som ställs på ubåtar till stor del överensstämmer med de som ställs på civila handelsfartyg. Fördelen med detta är tydliga standarder beträffande lösningar i många av ubåtens utrymmen tillsammans med att system särskilt anpassade för dessa standarder finns på marknaden. Nackdelarna är att ubåtar skiljer sig från handelsfartyg i stor utsträckning vilket kan medföra ett brandskydd som inte är helt anpassat för ubåten. Som alternativ till ett system utformat helt utifrån standarder finns möjligheten att använda sig av metoden "*alternativ utformning av brandskydd*" enligt Transportstyrelsen.

Tidigare genomförda försök visar att vattendimma har mycket god förmåga att kyla brandgaser och begränsa bränder samt skydda mot övertändning. Dessa egenskaper i kombination med intertering, som uppstår på grund av effektiv förångning, gör att vattendimma är effektivt i de slutna utrymmen som en ubåt består av. Försöken visar dock att vattendimma har svårt att släcka bränder helt på grund av de små vattendropparna, särskilt om bränderna är små och/eller dolda. Vattendimma har sämre förmåga att kyla ytor.

Om vattendimma kompletteras med andra lösningar för att hantera ovanstående begränsningar kan det vara en lösning väl lämpad att ersätta Halon 1301 ombord på ubåtar.

Summary

This report has been developed on behalf of SAAB Kockums AB to investigate the feasibility of replacing Halon 1301 with water mist as the firefighting system on submarines. Halon 1301 has historically been used as a firefighting agent on submarines due to its effective fire-suppressing properties, combined with its non-harmful effects on crew members within the confined spaces of the submarine.

Unfortunately, Halon 1301 poses significant environmental risks, leading to a ban for new installations in the late 1980s. This, in conjunction with stricter regulations mandating sprinkler systems in accommodation and public areas, created a market for water mist.

Water mist is a variant of sprinkler systems that, through high system pressure or by other means, generates a mist with very small droplets. The advantage of these small droplets is their efficient evaporation, enabling them to cool fire gases without requiring large amounts of water. The evaporation also creates water vapour which can inert the fire environment and consequently reduce the fire size. Submarines, sensitive to weight and changes in the center of gravity, could find water mist a suitable alternative to Halon 1301.

Beyond concerns about weight and the center of gravity, submarines face a challenging environment with their interiors entirely enclosed and filled with crew, sensitive equipment, and weaponry. The enclosed environment makes submarines vulnerable to pressure changes, imposing specific requirements on the firefighting systems used.

To investigate the feasibility of water mist on submarines, studies of the rules and regulations governing submarine operations have been conducted. The report also examines previous attempts and experiments involving water mist and/or submarines.

The analysis of rules and regulations indicates a significant correlation between those imposed on submarines and civilian merchant ships. The advantage lies in clear standards for solutions in many areas of the submarine, along with systems specially adapted to these standards available on the market. However, the drawback is that submarines differ significantly from merchant ships, potentially resulting in fire protection not entirely suited to or optimized for submarines. As an alternative to a system designed solely based on standards, the option exists to utilize the method of "alternative design of fire protection" as per the Swedish Transport Agency.

Previous experiments demonstrate that water mist has a high capability to cool fire gases and limit fires. However, the challenge for water mist is to provide full fire extinguishment, particularly if the fire is small or concealed. Water mist also encounters difficulties in cooling surfaces.

If water mist is combined with other solutions to address these limitations, it could be a well-suited solution to replace Halon 1301 on submarines.

Förkortningar

ANEP - Allied Naval Engineering Publication

BIBS – Built In Breathing System

CEV - Crew Exploration Vehicle

CFD - Computational Fluid Dynamic

DesignA - Designansvarig

DNV GL - Det Norske Veritas Germanischer Lloyd

FMV - Försvarets materielverk

FSS-koden - International Code for Fire Safety Systems

INSA - International Naval Safety Association

ISSF - International Submarine Safety Forum

LFC - Litiumjärnfosfat

LOX - Liquid Oxygen

LPD – Landing Platform Dock

MESMA - Module Energie Sous-Marin Autonome

MPCV - Multi-Purpose Crew Vehicle

MSB - Myndigheten för samhällsskydd och beredskap

NATO - North Atlantic Treaty Organization

NFPA - National Fire Protection Association

NMC - Litiumnickelmangan-koboltoxid

NSC - Naval Ship Code

NSubC - Naval Submarine Code

NSCA - Naval Ship Classification Association

RISE - Research Institutes of Sweden

SJÖI - Militära sjösäkerhetsinspektionen

SOLAS - International Convention for the Safety of Life at Sea

SFPE - Society of Fire Protection Engineers

SSK - Sub Surface Killer (konventionell attackubåt)

UKR - Ubåtsäkerhet: Krav och Rekommendationer

URF – Ubåtsräddningsfarkost

Ordförklaring

Aktiveringstemperatur – Den temperatur som bulben brister och sprinklern aktiverar.

Barlasttank – Eller ballasttank, är en tank inom eller utanför ubåtens tryckskrov, vilken vid dykning fylls med sjövattnen.

Bruttodräktighet – Även kallat bruttoregister-tonnage är fartygets totala volym och anges i registerton om 2,83 kubikmeter.

Built In Breathing System (BIBS) – Är ett i ubåten fast monterat andningssystem som används av besättningen då miljön ombord är försämrad. Kan ersätta tillgång på friskluft/ventilation vid brand.

Byssa – Köket ombord.

Displacement – Är vikten av den vattenmassa fartyget undantränger, det vill säga totalvikten av fartyget med last och allt. Ett örlogsfartygs storlek anges med dess displacement.

Displacementstyngdpunkt – Centrum för ubåtens displacement.

Durk – Golvet ombord.

Fast brandsläcksystem – Ett fast monterat system avsett att släcka eller begränsa en brand i ett utrymme eller en punkt.

K-faktor – Enhet för sambandet mellan tryck och flöde i ett sprinklermunstycke, anges (l/min)/bar^{1/2}.

Kollapsdjup – Det största djup som ubåten konstruerats för.

Kontrollrum – Även kallat manöverrum, är utrymmet där ubåten manövreras och striden leds.

Konventionellt sprinklersystem – Ett vanligt lågtryckssprinklersystem.

Konventionellt vattendimsystem – Ett ”vanligt” vattendimsystem som enbart använder trycksatt vatten för att skapa dimma. Benämns även för ”*single fluid-system*”.

Konventionell ubåt – Ubåtar kan indelas efter framdrivningssätt, atomubåtar eller konventionella ubåtar. Konventionella ubåtar är oftast mindre till storleken. Benämns internationellt ibland med förkortningen SSK, vilket innebär konventionell attackubåt.

Läns/länsa – Att pumpa ut vatten från ett fartyg.

Mäss – Matsalen ombord.

Robot - Roboten används för att bekämpa mål både på och över vattenytan och drivs fram med en egen drivkälla och kan under sin bana styras mot målet genom att den är försedd med egen målsökare.

Termoelement - Är en typ av temperatursensor som utnyttjar termoelektriska effekter för att mäta temperaturen.

Torped - Torpeden används för att bekämpa mål både på och under vattenytan, och den förekommer därför i olika storlekar och typer. Använder elektrisk drift eller framdrivning med väteperoxid.

Trimtank -Är tankar avsedda att möjliggöra viktfordelning i långskeppsled.

Ubåtsräddningsfarkost (URF) – Är en specialubåt som tillsammans med ubåtsräddningsfartyget HMS Belos utgör svenska marinens ubåtsräddningsystem. Om en ubåt tvingas till ofrivilligt bottenläge kan ubåtsräddningsfarkosten docka med ubåten och evakuera hela besättningen.

Vattentäthet – Mängd vatten per kvadratmeter som ett sprinklersystem levererar, anges i l/m² per minut eller mm/min.

Viktkompensationstank – Är tankar som används för att finjustera en ubåts vikt och i förlängningen läge i vattenvolymen. När exempelvis bränsle förbrukas fylls tanken för att kompensera vikten av bränslet.

Örlogsfartyg - Fartyg som tillhör en stats marina stridskrafter och har de yttre nationella kännetecken som utmärker örlogsfartyg. Örlogsfartyget har inmönstrad besättning som står under befäl av militär chef.

Innehållsförteckning

| | |
|--|-----|
| Förord..... | i |
| Sammanfattning..... | iii |
| Summary | v |
| Förkortningar..... | vi |
| Ordförklaring..... | vii |
| Innehållsförteckning..... | ix |
| 1 Inledning..... | 2 |
| 1.1 Bakgrund | 2 |
| 1.2 Syfte | 3 |
| 1.3 Mål | 3 |
| 1.3.1 Frågeställning | 3 |
| 1.4 Metod..... | 3 |
| 1.5 Avgränsningar och begränsningar | 3 |
| 1.5.1 Avgränsningar | 3 |
| 1.5.2 Begränsningar..... | 4 |
| 2 Ubåtar | 6 |
| 2.1 Inledning..... | 6 |
| 2.2 Grundläggande principer för brandskydd..... | 6 |
| 2.3 Utrymmen och brandrisker ombord | 8 |
| 2.3.1 Utrymmen och konstruktion..... | 8 |
| 2.3.2 Brandrisker | 10 |
| 3 Krav, regelverk och standarder..... | 14 |
| 3.1 Krav och regelverk | 14 |
| 3.1.1 Ubåtssäkerhet: Krav och Rekommendationer | 14 |
| 3.1.2 SOLAS 74 | 15 |
| 3.1.3 FSS-Koden | 16 |
| 3.1.4 TSFS 2009:98..... | 16 |
| 3.1.5 Naval Ship Code..... | 17 |
| 3.1.6 RMS-NSC | 17 |
| 3.1.7 RMS – F | 19 |
| 3.1.8 Rules for classification of ships..... | 20 |
| 3.2 Standarder..... | 21 |
| 3.2.1 IMO MCS.1/Circ.1387..... | 21 |
| 3.2.2 IMO MSC/Circ.1165..... | 22 |
| 3.2.3 IMO MSC.1/Circ.1432..... | 22 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.2.4 | IMO Resolution A.800 (19) | 22 |
| 3.2.5 | ISO 15371:2015 | 22 |
| 4 | Vattendimma | 24 |
| 4.1 | Systemuppbyggnad för vattendimma | 24 |
| 4.1.1 | Munstycken | 25 |
| 4.1.2 | Systemtyper | 26 |
| 4.1.3 | Droppgenerering | 26 |
| 4.1.4 | Systemtryck | 27 |
| 4.1.5 | Pumpar | 27 |
| 4.1.6 | Appliceringsmetod | 28 |
| 4.2 | Andra vanligt förekommande släcksystem på fartyg | 30 |
| 4.2.1 | Gassläcksystem | 30 |
| 4.2.2 | Konventionella sprinklers | 31 |
| 4.2.3 | Skumsläcksystem | 31 |
| 5 | Tidigare studier och försök | 32 |
| 5.1 | Inledning | 32 |
| 5.2 | Tidiga studier genomförda av US Navy | 32 |
| 5.2.1 | Inledande studier | 32 |
| 5.2.2 | Småskaleförsök | 32 |
| 5.2.3 | Fullskaleförsök | 32 |
| 5.2.4 | Påverkan på elektrisk utrustning | 32 |
| 5.2.5 | Skydd mot övertändning | 33 |
| 5.3 | Hyttförsök för korvett av Visbyklass | 34 |
| 5.3.1 | Hytten | 34 |
| 5.3.2 | Släcksystemet | 35 |
| 5.3.3 | Försöken | 35 |
| 5.3.4 | Resultat | 35 |
| 5.4 | New Technologies for Fire Suppression on Board Naval Craft (FiST) | 38 |
| 5.4.1 | Vattendimmas effektivitet i miljöer med stridsskador | 38 |
| 5.4.2 | Släcksystem i ammunitionsdurkar | 41 |
| 5.4.3 | Vattendimma ombord på ubåtar | 42 |
| 5.5 | Systemförsök genomförda av SFPE | 43 |
| 5.5.1 | Systemförsök | 43 |
| 5.5.2 | Resultat | 43 |
| 5.6 | Studier om litiumjonbatterier och vattendimma på ubåtar och fartyg | 44 |
| 5.6.1 | RISE – Lion Fire II | 44 |
| 5.6.2 | Vattendimma för litiumjonbatterier på ubåtar | 45 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.6.3 | Brandrisikanalys för konventionella ubåtar | 45 |
| 5.7 | Vattendimma på rymdfarkoster | 45 |
| 5.7.1 | Inledning | 45 |
| 5.7.2 | Försök med vattendimma | 46 |
| 5.7.3 | Resultat | 46 |
| 6 | Diskussion | 48 |
| 6.1 | Krav, regelverk och standarder | 48 |
| 6.2 | Tidigare studier och försök | 49 |
| 6.3 | Vattendimma ombord på ubåtar | 50 |
| 7 | Slutsats | 52 |
| | Referenser | 54 |
| | Bilaga 1 Släckmekanismer | 60 |

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Ubåtsoperationer är av sin natur riskfyllda, inte enbart på grund av de höga risker som finns helt naturligt i genomförandet av militära operationer i marin miljö. Risken för olyckor och konsekvenserna vid dessa är höga på grund av ubåtens karaktär och operationsmiljö oberoende av ett yttre hot. Av dessa tänkbara incidenter och olyckor är brand en av de absolut allvarligaste och mest svårhanterade då ubåten är trång och helt innesluten.

Målet med allt säkerhetsarbete i konstruktionen av ubåtar kan enkelt definieras på två sätt:

$$\# \text{ Ytlägen} = \# \text{ Dykningar}$$

(Vesterholm, 2018)

Sannolikheten för att under fredstid drabbas av dödsfall, invaliditet eller annan personskada i tjänsten för all personal, bör inte överstiga vad som anses acceptabelt i det civila samhället. Med nödvändighet måste högre risker accepteras i krig samt även i fredstid för vissa uppdrag i krigsliknande miljöer.

(Handbok Systemsäkerhet, 2022)

Historiskt har släckgas av typ Halon 1301 använts i utrymmen med förhöjd brandrisk, exempelvis maskinrum, samtidigt som bemannade utrymmen helt saknat fasta brandsläcksystem (Bohlin & Olofsson, 2012). Montrealprotokollet trädde i kraft 1988 i syfte att minska mängden ozonförstörande ämnen i atmosfären (*Wienkonventionen för skydd av ozonskiktet*, 1989). Detta innebar att nyinstallationer av gassläcksystem med halon som släckgas förbjöds, och befintliga installationer under årens lopp löpande fasats ut.

En tydlig ersättare till Halon 1301 är svår att hitta eftersom många av alternativen innebär stora nackdelar. Släckgaser som exempelvis koldioxid, kvävgas eller Novec 1230 begränsas av tryckupbyggnaden som inträffas vid utlösning. Andra nackdelar med dessa system är att de har hög vikt, är utrymmeskrävande och under vissa förhållanden kan vara direkt dödliga för besättningen. Konventionella sprinklersystem godkända för marint bruk är oftast tunga och kräver stora utrymmen för installation. Dessutom kräver dessa att stora mängder vatten förflyttas ombord på ubåten. Förflyttningar av stora mängder vatten riskerar att ändra ubåtens tyngdpunkt vilket kan resultera i stora konsekvenser (*RMS-F*, 2013).

Branden ombord på passagerarfärjan M/S Scandinavian Star 1990 (Palmberg & Georgsson, 2008) resulterade i en markant höjning av kraven på brandsäkerhet ombord på passagerarfartyg i internationell trafik. Krav ställdes på sprinkler i boende- och publika utrymmen. International Maritime Organization (IMO) tillät användandet av sprinklersystem som motsvarade konventionella sprinkler. Detta i kombination med Montrealfördraget skapade en marknad för vattendimsystem ombord på fartyg (Arvidson, 2020). Vattendimma är en typ av sprinklersystem som av National Fire Protection Association (NFPA) definieras som: 99 % av volymflödet ut från sprinklermunstycket består av droppar mindre än 1000 µm i diameter (NFPA, 2019).

Studier och försök med vattendimma ombord på ubåtar och örlogsfartyg har genomförts sedan slutet på 1970-talet (Darwin m.fl., 1999). Intresset för vattendimma som släcksystem ombord på ubåtar grundar sig i den låga vattenförbrukningen, vilket är att eftersträva då det ger en mer begränsad påverkan på stabiliteten. Dessutom beter sig vattendimma till viss del som en gas, vilket medför att släckinsatsen i en mindre grad påverkas av hinder i utrymmet jämfört med ett konventionellt sprinklersystem.

1.2 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att ta fram ett underlag för SAAB Kockums AB vid val av fasta brandsläcksystem ombord på framtidens ubåtar.

1.3 Mål

Målet är att analysera om vattendimsystem kan ersätta Halon 1301 ombord på ubåtar. Detta uppnås genom en kartläggning och sammanställning av krav och regelverk tillsammans med en sammanställning av tidigare genomförda studier inom ämnet vattendimma och ubåtar.

1.3.1 Frågeställning

För att uppnå ovanstående mål undersöks och om möjligt besvaras följande frågor:

- Hur ser kraven och regelverken ut; vilka är relevanta/tillämpbara för ubåtar?
- Finns det relevanta studier genomförda; vad säger dessa?
- Utifrån ovanstående; är vattendimma ett rimligt alternativ till Halon 1301 ombord på ubåtar?

1.4 Metod

Huvuddelen av arbetet har genomförts som litteraturstudier och sammanställning av rapporter, regelverk och tekniska specifikationer. SAAB Kockums AB har stöttat med en inblick i ubåtskonstruktion och bidragit med tillgång till särskilda regelverk.

För studien om *tidigare genomförda försök* genomfördes en litteraturstudie. En artikel tillhandahölls initialt av SAAB Kockums AB och förslag på relevanta artiklar gavs av den biträdande handledaren. De erhållna artiklarna kompletterades med en bred sökning på sökmotorn Google och fördjupad litteratursökning på *LUBSearch* med sökord som *ubåt*, *vattendimma*, *submarine* och *watermist*. Utifrån dessa artiklar sorterades de som inte bedömdes vara relevanta ut och artiklar som berörde vattendimma, brandsäkerhet ombord på ubåtar och brandsäkerhet på örlogsfartyg behölls.

Referenslistorna i de utvalda artiklarna användes för att hitta nya källor, där vissa som ej var tillgängliga tillhandahölls av den biträdande handledaren. Metoden som användes kallas *snowballing* (Säfstén & Gustavsson, 2020).

Av de artiklar som nu erhållits valdes åtta artiklar och dokument som ansågs vara relevanta ut. Relevansen bedömdes utifrån hur väl försöken i rapporterna representerade en ubåtsmiljö och om de direkt eller indirekt berörde ubåtar och vattendimma.

Studien om *Krav, regelverk och standarder* inleddes med RMS-F, där hänvisningar till andra regelverk hittades. Utifrån dessa hittades nya hänvisningar vilka följdes och proceduren upprepade sig tills SOLAS 74 nåddes, vilket är det övergripande regelverket för all sjöfart. De regelverk som inte var offentliga erhöles av SAAB Kockums AB efter förfrågan.

1.5 Avgränsningar och begränsningar

1.5.1 Avgränsningar

Arbetets avgränsningar är att enbart behandla öppen och tillgänglig information. En annan avgränsning är att endast nationella regelverk och krav har inkluderats. Där klassningssällskap berörs har rapporten begränsats till att enbart behandla kraven från sällskapet Det Norske Veritas Germanischer Lloyd (DNV GL).

Arbetet berör och fokuserar enbart på mindre konventionella ubåtar (SSK), vilka svenska marinen opererar och SAAB Kockums AB tillverkar. Ingen specifik typ av ubåt har studerats.

I arbetet görs ingen direkt jämförelse mellan Halon 1301 och vattendimma utan arbetet görs förutsättningslöst utifrån möjligheterna med vattendimma.

1.5.2 Begränsningar

Rapporten har begränsats av att simuleringar och försök inte har kunnat genomföras. Om någon av dessa hade varit möjligt att genomföra hade resultat med en tydligare koppling till ubåtsmiljön eventuellt varit möjliga att presentera.

2 Ubåtar

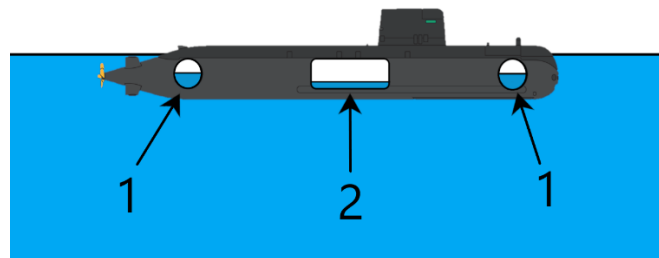
2.1 Inledning

Ubåtar är genom sin unika konstruktion och operationsmiljö väldigt speciella farkoster ur många hänseenden, i synnerhet med tanke på brandskydd och säkerhet. Utformningen av brandskyddet skiljer sig från ytfartyg. Förmågan till dolt uppträdande sammanfattas kort i skriften Taktik för marina operationer:

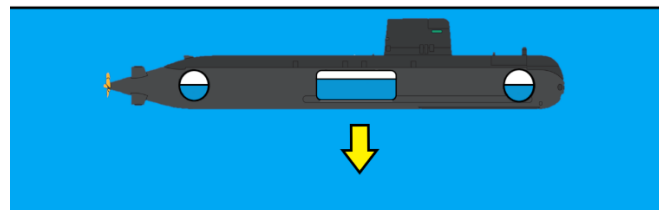
”Ubåtens unika förmåga att uppträda dolt, och därmed undvika upptäckt och bekämpning, är en avgörande framgångsfaktor för att genomföra en effektiv och lyckad insats/operation.”

(Försvarsmakten, 2021)

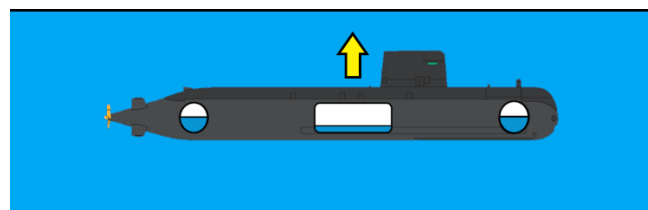
2.2 Grundläggande principer för brandskydd



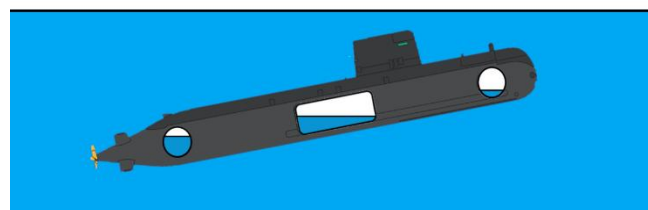
Figur 2.1 Ubåt i ytläge. (1.trimtank 2.barlast-/viktkompensationstank)



Figur 2.2 Ubåten fyller tankarna med vatten och sjunker.



Figur 2.3 Ubåten tömmer tankarna på vatten och stiger.



Figur 2.4 Ubåten fyller en trimtank och ändrar sitt trim

En ubåt varierar sin flytkraft för att kunna stiga och sjunka enligt principskisserna i Figur 2.1, Figur 2.2, Figur 2.3 och Figur 2.4. Detta görs genom att fylla och tömma sjövattnen i barlasttankar och viktkompensationstankar. I ytläge är tankarna tomma (Figur 2.1) och för att sjunka släpps luft ut och tankarna fylls med vatten (Figur 2.2). För att stiga används tryckluft som trycker ut vattnet och gör ubåten lättare vilket gör att den stiger uppåt (Figur 2.3). Barlasttankarna är antingen helt fulla eller helt tomma. Viktkompensationstankarna används för att finjustera ubåtens läge i vattnet och mängden vatten varierar vid behov. För att trimma ubåten finns trimtankar placerade i fören och aktern. Vatten pumpas mellan trimtankarna för att ändra ubåtens trim i vattnet (Figur 2.4).

Ovanstående egenskaper innebär att ett brandsläckningssystem inte kan utformas som på vanliga fartyg eller än mindre som på land. I Försvarsmaktens Regler för marin sjöfart – Farkoster (RMS-F) finns undantag och särskilda krav och undantag för ubåtar. Där finns åtta principer för brandskydd och brandbekämpning på ubåtar:

1. *Det totala brandskyddet skall utformas med beaktande av att brand är en av de största riskerna för ubåten och dess besättning.*
2. *Ubåten får inte bli tyngre under pågående brandbekämpning i uläge.*
3. *Brandbekämpning får inte resultera i förlust av djupkontroll eller instabilitet i trim.*
4. *Det skall gå att forcerat ventilerat ut brandrök ur ubåten vid snorkelläge och ytläge.*
5. *Ubåtens konstruktion skall minimera sannolikheten för uppkomst av brand.*
6. *Ubåtens konstruktion skall minimera risken att brand inte upptäcks eller uppföljs.*
7. *Ubåtens konstruktion skall minimera konsekvensen av både större och mindre brandincidenter.*
8. *Ubåtens konstruktion och utrustning skall vara sådan att fartygets besättning effektivt kan leda och genomföra brandbekämpning.*

(RMS-F, 2013)

För ett brandsläckningssystem där vatten används som släckmedel, exempelvis konventionellt sprinklersystem, brandposter och vattendimma, är vattenmängden som krävs vid en släckinsats viktig att hålla låg. Om sjövattnen tas in utifrån och används som släckvatten ökar ubåtens vikt och därigenom påverka ubåtens möjligheter att vid en brand och efterföljande aktivering av släcksystemet nå ytläge (se punkt 2).

En släckinsats med vatten kan även påverka en ubåt negativt utan att vatten tas utifrån. Vid en släckinsats där släckvattnet lagras ombord kan ubåtens balans påverkas då tyngdpunkten ändras när tanken töms och vattnet flödar ut för att släcka branden (se punkt 3) (Försvarsmakten, 2013).

I RMS-F finns även åtta punkter på hur ubåtens brandskydd skall vara utformat med avseende på ubåtens särskilda natur.

1. *Den slutna volymens inverkan på tryck, syrehalt och ventilationsbegränsningar vid brand och brandbekämpning.*
2. *Den begränsade tillgången på frisk luft innebar att en brand normalt blir syrebegränsad, om branden inte släckts dessförinnan.*
3. *Hydrostatiska begränsningar som begränsar kvantiteterna av vatten som kan användas för brandbekämpning och avkylning av brandgränser.*
4. *Syrekoncentrationen kan avvika från den normala atmosfärens.*
5. *Ubåten är vattenomsluten vilket ger en effektiv kylning av tryckskrovet vid brand.*
6. *Tryckavlastning av system med brandfarliga fluider måste hanteras inuti ubåten.*
7. *En stor del av besättningen är alltid i tjänst och avstånden är små vilket kan medge snabba insatser från besättningen.*
8. *Det är ofta inte möjligt att separera utrymmen med hög brandrisk eller potentiellt hög brandbelastning från andra sådana utrymmen eller på annat sätt farliga eller kritiska områden.*

(Försvarsmakten, 2013)

Här finns förhållanden som är viktiga att ta hänsyn till för ett fast brandsläcksystem.

Utrymmet innanför tryckskrovet är en sluten volym vilket medför att de tryckskillnader som uppstår vid en brand och släckinsats måste tas i åtanke (punkt 1). Brandens påverkan på syrehalten i utrymmet (punkt 2) samt mängden vatten som kan användas (punkt 3).

RMS – F ställer krav på att en ubåt skall ha kapacitet att länsa minst 5 m³/h (83,3 L/min) ner till kollapsdjup (CD). Tryckfasta skott skall vara så täta att de vid vatteninträngning efter 7 dagar har ett maximalt absolut sluttryck på 150 kPa (1,5 bar).

I slutrapporten för det multinationella projektet *New Fire Suppression Technologies on Board Naval Ships (FiST)* (Hiltz m.fl., 2015) där Sverige ingick som partner finns ett ytterligare urval av parametrar som ett fast brandsläcksystem på ubåtar bör utformas efter:

- Vilket är brandscenariot (bränsle, storlek med mera) och vad är målsättningen med släckinsatsen (skall branden släckas helt eller bara begränsas)?
- Överväganden gällande personalens säkerhet, miljöhänsyn och skador på utrustning vid avsiktlig och oavsiktlig utlösning av systemet.
- Fasta brandsläcksystemets storlek, volym och elkraftbehov.
- Fasta brandsläcksystemets tillförlitlighet och tillgänglighet.
- Certifieringskrav och kostnad.

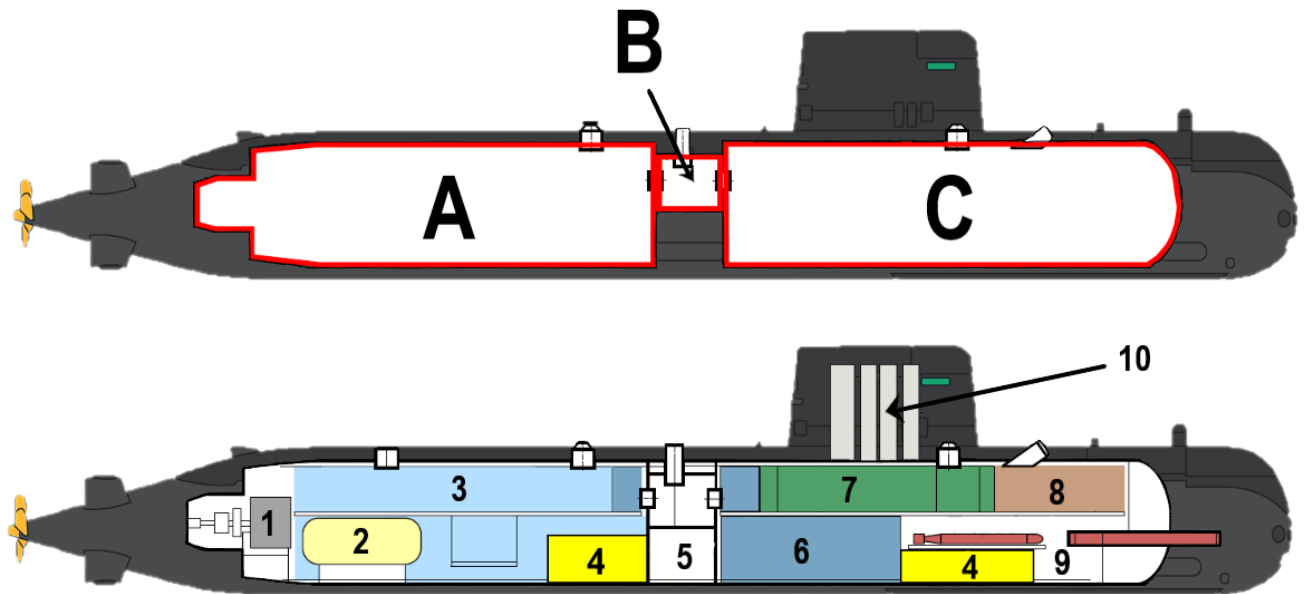
Sammanfattningsvis kan det konstateras att ett fast brandsläcksystem skall kunna släcka eller kraftigt begränsa bränder i utrymmen med hög risk samtidigt som vattenförbrukningen och elkraftbehovet minimeras. Allt detta i en sluten miljö där kritiska system och besättning skall påverkas så lite som möjligt. Systemet skall vara såpass kompakt att det får plats ombord på en ubåt.

2.3 Utrymmen och brandrisker ombord

2.3.1 Utrymmen och konstruktion

För att motstå det yttre sjövattnetrycket har ubåtar ett tryckskrov. Tryckskrovet syns inte från utsidan men är det ”vattentäta rör” som är fyllt med ubåtens inre utrymmen. Tryckskrovet innehåller flera olika tryckfasta avdelningar, där hela besättningen i nödläge skall kunna vistas under en längre tid.

Utanpå tryckskrovet finns formskrovet, det som ses utifrån, som har till uppgift att ge ubåten en god hydrodynamisk form och omge den utrustning som är placerad utanför tryckskrovet. Formskrovet är inte tryckfast och är omgivet av vatten på båda sidor (*RMS-F*, 2013).



Figur 2.5 Tryckfasta avdelningar (övre) och utrymmen (nedre).

Akterlig tryckfast avdelning (A)

Den aktra tryckfasta avdelningen innehåller maskinrum och teknisk utrustning och är inte alltid bemannat under gång. Utrymmet innehåller:

1. Propellermotor
2. Tank för flytande syre (LOX-tank)
3. Maskinrum
4. Batteri

Passage (B)

Passagen förbinder den förliga och akterliga tryckfasta avdelningen med genomgångsluckor. Den innehåller anslutningsmöjlighet för kollektiv räddning med ubåtsräddningsfarkost (URF).

Förlig tryckfast avdelning (C)

Den förliga tryckfasta avdelningen är ständigt bemannad under gång och består av:

4. Batteri
6. Maskin/elapparatur
7. Besättningsutrymmen (byssa (kök), mäss, hytter med mera)
8. Kontrollrum
9. Torpedrum

Övriga utrymmen

5. Dieseltank
10. Snorkel och master

2.3.2 Brandrisker

En okontrollerad brand ombord är förödande för besättning och för ubåtens fortsatta funktion med risk för totalförlust av ubåten. Men även om brandspridningen stoppas och branden begränsas till startutrymmet kan det enligt en australisk rapport leda till en totalförlust av ubåten genom exempelvis att (Depetro m.fl., 2021):

- Branden orsakar skador på system och utrustning vitala för framdrift och manöver.
- Värmen från branden försvagar tryckskrovet.
- Torpeder och andra vapen ombord påverkas av branden, vilket leder till att laddningen detonerar.

Att värmen skulle kunna försvaga tryckskrovet är förvisso inte omöjligt, men då utsidan av tryckskrovet är i kontakt med sjövattnet på utsidan motsäger det RMS-F där det står att *”ubåten är vattenomsluten vilket ger en effektiv kylning av tryckskrovet vid brand”* (RMS-F, 2013). Dessutom så kommer, enligt RMS-F, en brand i en ubåt snabbt bli syrebegränsad och därav minska i storlek *”Den begränsade tillgången på frisk luft innebar att en brand normalt blir syrebegränsad, om branden inte släckts dessförinnan”* (RMS-F, 2013). Om branden skulle inträffa tillsammans med ett läckage på LOX-tanken blir förhållandena helt andra.

Enligt den australiska rapporten stod brand för 46 % av incidenterna ombord på konventionella ubåtar (det vill säga mindre ubåtar som inte drivs av en kärnreaktor) och 47 % av alla dödsfall på samtliga ubåtstyper (Depetro m.fl., 2021).

En amerikansk rapport genomförd av Naval Research Laboratory för den amerikanska flottan hänvisar till brandhistorik från Naval Sea Systems Command (NAVSEASYS COM). Brandhistoriken säger att det under en 24 års period med 137 operativa ubåtar över tiden skedde i snitt 32 bränder per år ombord. 45% av bränderna spred sig från startområdet och ubåtarna var ur bruk i snitt 27 dagar efter bränderna (Hoover m.fl., 2005).

Den amerikanska rapporten hade bränder och explosioner relaterat till hydraulik ombord på ubåtar som huvudfokus. Inom ramen för arbetet genomfördes brandförsök år 2003 ombord på den utrangerade USS Shadwell. Försöksuppställningen ställdes upp för att motsvara förutsättningarna i den förliga avdelningen ombord på ubåtar av Los Angeles-klass. Brandeffekten varierades mellan 1,26 MW och 6,30 MW och branden var lokaliserad i torpedrummet.

Testkriterierna var en lufttemperatur på mindre än 100 °C och en sikt på mindre än 1,7 meter. Syre-, Kolmonoxid- och Koldioxidnivåer inkluderades inte då det antogs att besättningen skulle ta på sig fartygets egna masker (BIBS) vid första indikation om kontaminerad luft.

Resultaten visade att rummet där branden startade (torpedrummet) blev totalförstört och att förhållandena snabbt överskred testkriterierna i de närliggande utrymmena. Även vid den minsta brandeffekten så hade utrymning av närliggande utrymmena blivit oundviklig inom några minuter (Hoover m.fl., 2005). Testutrymmet och Los Angeles-klassen är betydligt större än mindre konventionella ubåtar (SSK) vilket borde ge ett ännu snabbare tidsförlopp ombord på de mindre ubåtarna.

2.3.2.1 Maskinutrymmen

I maskinrummet (3) finns dieselgeneratorer och stirlingmaskineri som är till för att ladda batterierna och driva propellermotorn. I maskinrummet finns flertalet maskiner och annan utrustning som är kritiska för ubåten. Ett exempel är propellermotorn, som inte har någon redundans, och om den blir utslagen så förloras ubåtens förmåga till framdrift.

I ett examensarbete från 2009 om strukturellt brandskydd ombord på marina farkoster listas ett antal kritiska system i maskin- och hjälpmaskinrum, sammanställningen genomfördes utifrån en riskanalys inom projekt Viking (Kockums III) (Karlsson & Vinberg, 2009):

- Batteriventilation.
- Roderstyrning.
- Propellermotor.
- Framdrivningskonsol.
- Rör och ventiler för nödblåsning av ballasttankar.

Brandriskerna hos dieselmotorerna är till stor del kopplat till att bränslet eller smörjoljan börjar läcka under högt tryck och i kombination med heta ytor startar en diesel- eller oljebrand.

Stirlingmotorer är unika och fungerar inte som vanliga förbränningsmotorer, vilket ger andra risker. Våldigt förenklat kan man säga att stirlingmotorer använder sig av temperaturskillnader för att skapa höga och låga tryck som används för att driva en generator. Temperaturskillnaden skapas genom att förbränna diesel och syre i en förbränningskammare för att få fram den höga temperaturen och kallt sjövattnet för den låga temperaturen (Depetro m.fl., 2021). Syret som används i processen förvaras i flytande form (Liquid Oxygen, LOX) i det som benämns LOX-tanken (2).

Ubåtens maskinrum kan bibehålla funktion utan att det är bemannat, vilket ger möjligheten att aktivera släcksystemet efter att personalen utrymt utan att förlora ubåtens möjlighet att fullfölja uppdraget.

2.3.2.2 Batteriutrymme

Blybatterier

I dagsläget används blybatterier ombord på ubåtar. Dessa batterier är placerade i två olika batteriutrymmen (4) i botten av den förliga och aktra tryckfasta avdelningen. Batterierna är kritiska för ubåtens framdrift.

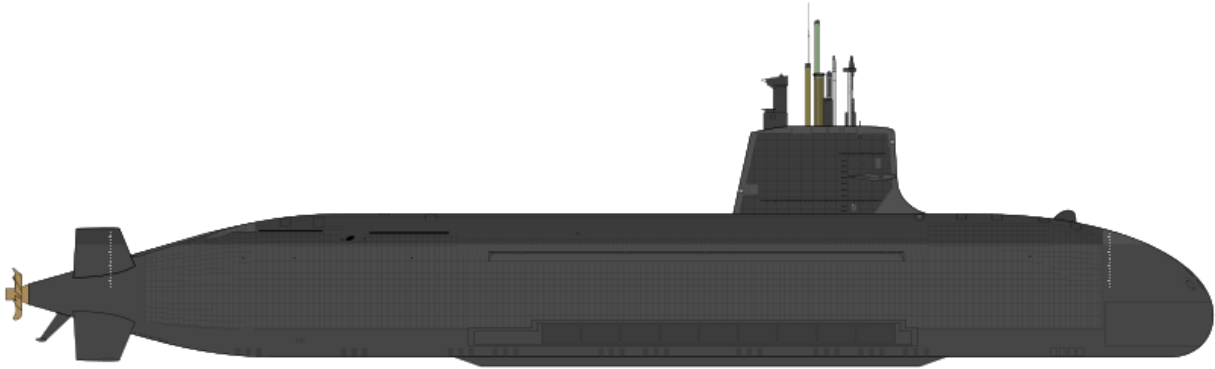
Enligt *Arbetskyddsstyrelsens kungörelse med föreskrifter om blybatterier för drivning av fordon* från 1988 innehåller blybatterier utspädd svavelsyra, även kallad batterisyra vilket är frätande.

När ett blybatteri laddas frigörs både vätgas och syrgas. Om vätgas blandas med syre eller luft skapas ”knallgas”, något som är mycket explosivt och brandfarligt. Vid höga cellspänningar ökar gasutvecklingen och svavelsyradimma bildas. Svavelsyradimma är mycket frätande. Den explosion och/eller brand som kan uppstå i samband med laddning och underhåll av blybatterier kan orsaka stora skador på både personal och materiel (Arbetskyddsstyrelsen, 1988). För att minimera riskerna med brännbara gaser finns ventilation kopplat till ett system som genom en katalytisk process binder vätgasen (Karlsson & Vinberg, 2009).

Litiumjonbatterier

Flera länder och varv arbetar med att ersätta blybatterierna ombord på ubåtarna med litiumjonbatterier. Länder som Tyskland (*The Submarine Revolution*, 2019), Frankrike (Valenti, 2022) och Italien (Willett, 2023) har planer på att använda litiumjonbatterier ombord. Litiumjonbatteriernas fördel är bland annat att de har mycket bättre energitäthet än traditionella blybatterier. Nackdelen är att detta medför en större brandrisk.

Ett land som har förverkligat planerna med litiumjonbatterier är Japan som 2018 sjösatte ubåten Ōryū av Sōryū-klass. Ubåten som tillverkas av Mitsubishi Heavy Industries använder sig av batterier av typ nickel-kobolt-aluminiumoxid (NCA). Enligt FMV Teknisk Und Materielunderrättelser 2019 har varvet skapat en lösning med en för japanerna acceptabel risknivå (FMV, 2020).



Figur 2.6 Ubåt av Sōryū-klass (bild hämtad ifrån Wikimedia Commons, bild: Mike1979 Russia).

Största brandrisken hos litiumjonbatterier är termisk rusning, vilket innebär att batteriet blivit påverkat av exempelvis mekanisk eller elektrisk påverkan, kortslutning i battericell eller elektrisk påverkan vilket leder en accelererande temperaturökning. Vid tillräckligt hög värme frigörs syre från de metalloxider som är vanligt förekommande i litiumjonbatterier. Det frigjorda syret kan i sin tur reagera med den brännbara elektrolyt som finns i batteriet. I en ubåt behövs stora batterier vilket kan resultera i flera hundra ton brännbar elektrolyt (Depetro m.fl., 2021). När termisk rusning inträffar i ett batteri kan den sprida sig. Värmeutvecklingen i det första batteriet kan orsaka en ny termisk rusning i närliggande batterier. Dessa celler kan sedan påverka nästa cell som i sin tur påverkar nästa cell vilket skapar en kedjereaktion (MSB, 2020).

Blandningen av syre, brännbara elektrolytångor och hög temperatur kan resultera i ett häftigt brandförlopp vilket orsakar en svårsläckt brand, då den termiska rusningen skapar alla delar som krävs för en självuppehållande brand (MSB, 2020).

En termisk rusning sker på cellnivå i batteriet och genererar enorm värme i cellen på väldigt kort tid, oftast få sekunder. En spridning mellan celler utgör den största risken för att man förlorar batteriet.

En brand i batterirummet orsakad av termisk rusning kan komma att påverka olika system så som framdrivning och en försvagning av skrovet, vilket skulle kunna leda till totalförlust av ubåten. Om värmen, röken och gaserna genererade av den termiska rusningen skulle ta sig till besättningsutrymmen skulle ubåten med största sannolikhet tvingas att inta ytläge.

Beroende på ubåtens verksamhet skulle detta vara förödande för dess förmåga att genomföra uppdraget (Depetro m.fl., 2021).

2.3.2.3 Besättningsutrymmen

Till besättningsutrymmen (7) räknas ubåtens byssa, mäss och hytter. I nära anslutning finns även kontrollrummet (8). Dessa utrymmen har på tidigare generationer av ubåtar helt saknat fasta brandsläcksystem. Samtliga av dessa utrymmen är mer eller mindre konstant bemannade under gång och kan inte utrymmas utan att ubåtens operativa förmåga förloras.

I kontrollrummet finns flertalet kritiska system (Karlsson & Vinberg, 2009):

- System kopplade till manöver och navigation.
- System kopplade till stridsledning, sensorer och sambandssystem.
- Nödutrustning.

Hytter och kontrollrum är bemannade över tid. Byssa och mäss är bemannade stor del av tiden. Detta innebär att en eventuell brand kan upptäckas av besättningen och bekämpas i ett tidigt skede.

Ubåten är utrustad med Built In Breathing System (BIBS) (*RMS-F*, 2013), ett system som med hjälp av masker ger besättningen möjlighet att andas friskluft i fall där luften blir kontaminerad under två timmar. Detta begränsar risken för att besättningen skadas av brandgaser med exempelvis låga syrehalter och höga halter av koldioxid och kolmonoxid. Det innebär att ubåten har förmåga att fortsätta att operera även i förhållanden där luften är kontaminerad i en begränsad tidsperiod, för att senare genomföra ventilering i ytläge eller vid snorkling. Trots BIBS utgör en av brandgaser kontaminerad miljö en stor risk för besättningens säkerhet och hälsa.

Ombord på ubåten är endast brännbara material som kommer i kontakt med andningsluft tillåtna om de är godkända i prov enligt IMO Resolution MSC.61(67), FTP Code (International Maritime Organization, 1996) (*RMS-F*, 2013).

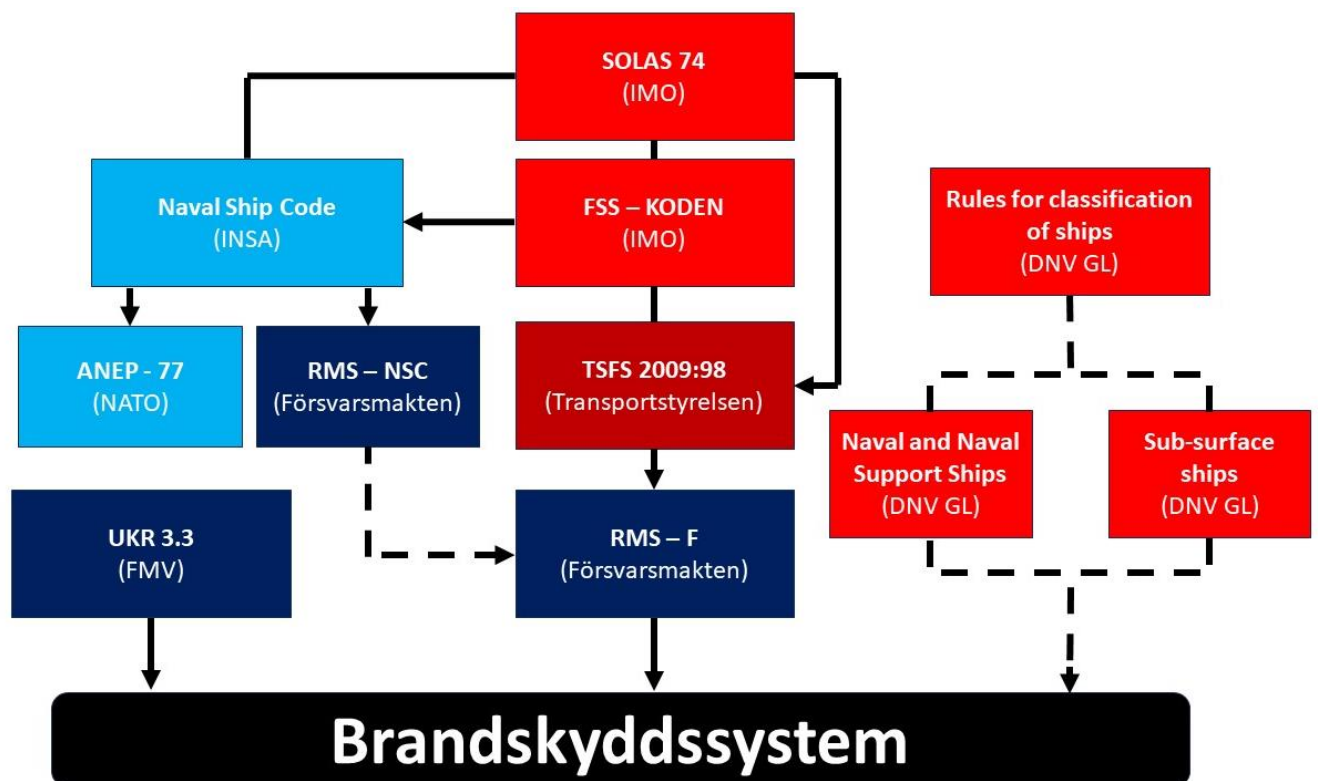
Av besättningsutrymmen står byssan för en stor brandrisk, särskilt om den är utrustad med fritös eller motsvarande köksutrustning.

3 Krav, regelverk och standarder

3.1 Krav och regelverk

Krav och regelverk påverkar hur brandsäkerheten utformas ombord på alla fartyg på världshaven, civila som militära. Sjöfarten spelar en viktig roll för världshandeln vilket innebär att stora internationella lagstiftningar är grunden för all sjöfart och säkerheten på haven. För att kunna tolka dessa lokalt finns nationella tolkningar och undantag.

Majoriteten av dessa har enbart civila sjöfarten i åtanke. Då kraven som ställs på örlogsfartyg är annorlunda kompletteras de civila kraven och regelverken med militära krav. För specifikt ubåtsäkerhet finns det få multinationella regelverk eftersom olika länders ubåtsverksamhet är nationella säkerhetsintressen.



Figur 3.1 Sammanställning av hur regelverken hänger ihop. Civila regelverk är röda och militära regelverk blåa. Internationella regelverk är ljusa och nationella mörka. Streckad linje innebär indirekt påverkan för ubåtar.

3.1.1 Ubåtsäkerhet: Krav och Rekommendationer

Ubåtsäkerhet: Krav och Rekommendationer 3.3 (UKR) (*Ubåtsäkerhet: Krav och Rekommendationer*, 2014) utgör tillsammans med RMS de säkerhetskrav som ställs på ubåtar. UKR är Försvarets materielverks (FMV) styrande krav och rekommendationer för ubåtsäkerhet. UKR är en sammanställning av lösningar och principer grundade på erfarenheter som utgör ett underlag för säkerhetsarbetet vid olika former av modifieringar och nybyggnation. I UKR är tre grundfilosofier om säkerhet kravställda:

- *Säkerhet skall inte efter sättas av ekonomiska skäl.*
- *Onödigt tekniskt komplicerade lösningar skall undvikas.*
- *Principen om dubbel säkerhet skall gälla genomgående.*

(*Ubåtsäkerhet: Krav och Rekommendationer*, 2014)

Kapitel 14 i UKR berör brandskydd och betonar att brandskydd måste prioriteras mycket högt då en brand kan få särskilt höga konsekvenser i ubåtars slutna atmosfär. Drivmedel, smörjmedel, matfett och elektriska komponenter är naturligt brandfarliga och utgör en risk för brand.

Besättningens konstanta närvaro vid drift uppges göra en riskreducerande faktor då det ofta visat sig att besättningen upptäcker en brand eller en begynnande brand innan det automatiska brandlarmsystemet.

I underkapitlet om brandbekämpning listas de mest sannolika typerna av brand på en ubåt:

- *Elbrand på grund av kortslutning eller dylikt.*
- *Oljebrand, exempelvis oljedimbrand från läckande oljeledning under tryck.*
- *Brand i övrigt brännbar materiel, exempelvis i byssa.*

(Ubåtssäkerhet: Krav och Rekommendationer, 2014)

I delen om fasta system ställs krav på att utformningen och placering av detektorerna som kontrollerar utlösningen av systemet skall väljas utifrån förutsättningarna så att aktivering av släcksystemet sker snabbt samt så att vådautlösningar av systemet undviks. Systemets kontroll och övervakningsenhet skall placeras utanför det område som systemet skyddar och systemet skall strömförsörjas från den säkraste kraftkällan med en brandskyddad kabel.

För generatoraggregat (diesलगeneratorer) rekommenderas ett fast brandbekämpningssystem som ska kunna manövreras självständigt och med minimal påverkan på intilliggande utrustning (punktskydd). Slutna motormoduler med fast monterade brandbekämpningssystem rekommenderas.

Det rekommenderas att ett fast brandsläckningssystem skall finnas i utrymmen med brandrisk samt i de utrymmen där en släckinsats kan medföra stora risker för besättningen och materiel. Det krävs även att släckmedlet skall väljas för optimal effekt till potentiella brandkällor och risker samtidigt som det i minsta möjligaste mån skadar personal, materiel och miljö (*Ubåtssäkerhet: Krav och Rekommendationer, 2014*).

3.1.2 SOLAS 74

International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS) är en internationell konvention som utges av FN-organet International Maritime Organization (IMO). SOLAS togs fram som ett svar på Titanicolyckan år 1912 och antogs år 1914. SOLAS anses vara det viktigaste regelverket inom sjösäkerhet världen över. Den senaste gällande konventionen är SOLAS 74 som fastställdes 1974 men har uppdaterats och reviderats många gånger sedan dess. SOLAS består av kapitel som exempelvis berör konstruktion, brandskydd, livräddning, radiokommunikation, navigationssäkerhet och farligt gods (*International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974*)

Kapitel II-2 brandskydd, detektion och brandsläckning ombord på fartyg (*International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974*). Bestämmelserna gäller i grunden för alla typer av fartyg men detaljerade bestämmelser finns för de vanligaste typerna av civila handelsfartyg (tankbåtar, lastfartyg och passagerarfartyg). Stor del av detta är inte direkt applicerbart på varken örlogsfartyg generellt eller ubåtar specifikt. Fartygens indelning i olika former av brandzoner, användande av brännbart material, möjlighet till släckning av branden i olika utrymmen och utrymningsvägar berörs.

I de delar som berör sprinkler och vattendimmsystem står det att dessa skall vara godkända enligt Resolution A.800 (Revised guidelines for approval of sprinkler systems equivalent to that referred to in SOLAS regulation 11-2/12) eller motsvarande. Standarder för vattendimmsystem finns i Appendix 1, där kapitel med krav och provningsmetoder finns.

3.1.3 FSS-Koden

FSS-koden (International Code for Fire Safety Systems) är utvecklat av IMO som ett komplement till SOLAS Kapitel II-2 för att tillhandahålla internationella standarder för brandskyddssystem och utrustning (*FSS Code*, 2007).

Kapitel 7 berör *”fixed pressure water-spraying and water-mist fire-extinguishing systems”*. Här ställs exempelvis krav på att munstyckena skall vara godkända och monterade så att en vattentäthet på minst 5 l/m² per minut uppnås. Åtgärder skall vidtas så att smuts och orenheter som rost inte täpper till munstyckena. Pumpen och dess kontrollsystem skall placeras utanför de utrymme som det är tänkt att skydda så att en brand inte skall kunna slå ut det. Vattendimsystem motsvarade halon-system skall vara godkända enligt MSC/Circ.1165.

Kapitel 8 *”Automatic sprinkler, fire detection and fire alarm systems”* berör sprinklersystem ytterligare, specifikt automatiska sprinklersystem. Krav ställs på att systemet skall vara av våtrörstyp men undantag får göras i särskilda utrymnen såsom bastu.

Krav för elkraftförsörjning av sprinklersystem finns enbart för passagerarfartyg och lastfartyg och är inte direkt tillämpligt på örlogsfartyg och ubåtar. Sprinklersystemets aktiveringstemperatur skall vara mellan 68 °C och 79 °C, undantag får göras i särskilda utrymnen, men aktiveringstemperaturen skall aldrig vara mer än 30 °C över temperaturen i takhöjd.

3.1.4 TSFS 2009:98

TSFS 2009:98 är *”Transportstyrelsens föreskrifter och allmänna råd om brandskydd, branddetektering och brandsläckning på SOLAS-fartyg byggda den 1 juli 2002 eller senare”* och har syftet att *”minimera risken för att bränder och explosioner uppstår, minimera risken för personskador, minimera risken för skador på fartyget, dess last och miljön, maximera möjligheten att innesluta, kontrollera och kväva bränder och explosioner i de utrymnen där de uppstår, och ge tillräckliga och lättillgängliga utrymningsmöjligheter åt de ombordvarande”* (TSFS 2009:98, 2009).

TSFS 2009:98 är den svenska tolkningen av SOLAS kapitel II-2 och FSS koden. När det i SOLAS 74 och FSS Koden hänvisas till *”Administration”* är det i Sverige och för svenskflaggade fartyg Transportstyrelsen som åsyftas. Föreskrifterna är i huvudsak uppdelad i tre bilagor (bilaga 1: tolkning av SOLAS 77 kapitel II-2, bilaga 2: tolkning av FFS koden och bilaga 3: anvisningar för utformning av alternativt brandskydd).

Regel 10 i bilaga 1, del C berör brandbekämpning, och har syftet att brand skall bekämpas och släckas i det utrymme som den uppstår genom att *”fasta brandsläckningssystem installeras och dimensioneras med hänsyn till brandbelastningen i utrymmet och brandsläckningsutrustningen är lättåtkomlig och kan användas omedelbart”*.

Punkt 5.6 berör punktskydd i maskinrum och skall tillämpas ombord på *”passagerarfartyg med en bruttodräktighet av minst 500 och lastfartyg med en bruttodräktighet av minst 2 000 ton”*. Maskinrum i Kategori A, vilket innebär ett maskinrum med en volym på över 500 m³, skall vara utrustade med ett system som är utformat enligt MSC.1/Circ.1387.

Stycke 6 handlar om *”Brandsläckningsarrangemang i bostadsutrymnen, arbetsutrymnen och kontrollstationer”* men berör till stora delar tillämpningen av sprinklersystem på passagerar- och lastfartyg. Brandskydd av fritöser nämns som en egen punkt och här ställs krav på ett automatiskt eller manuellt brandsläckningssystem som uppfyller kraven i ISO 15371:2000 (ISO 15371:2000 är ersatt av ISO 15371:2015) samt rekommenderar att anvisningarna i MSC.1/Circ.1433 (TSFS 2015:53) följs. MSC.1/Circ.1433 gäller även för ventilationstrummor i kök.

Regel 17 i bilaga 1 beskriver tillvägagångsätt för alternativ brandskydd. Transportstyrelsen kan godkänna en alternativ utformning som inte följer detaljkraven om den har genomgått en brandteknisk analys, utvärderats och godkänts enligt regel 17, samt uppfyller föreskrifternas syfte och funktionskrav. Den alternativa utformningen måste ge samma säkerhetsnivå eller högre än de brandskyddsåtgärder som anges i detaljkraven.

Regel 19 i bilaga 1 ”Särskilda krav för transport av farligt gods” sammanställer de extra krav på åtgärder som fartyg som transporterar farligt gods måste följa.

Regel 7 i bilaga 2 specificerar de krav på fasta brandsläckningssystem för vattenspridning och vattendimma som föreskrivs i konventionen. Kapitlet 7 (i bilaga 2) i TSFS 2009:98 motsvarar Kapitel 7 i FSS Koden. För fartyg byggda efter september 2008 skall brandsläckningssystem med vattendimma i maskinrum och pumprum uppfylla kraven i MSC/Circ.1165 med tillägg enligt MSC/Circ.1237, MSC/Circ.1269, MSC.1/1385 och MSC.1/1386 eller likvärdig standard.

Regel 8 i bilaga 2 i TSFS 2009:98 motsvarar kapitel 8 i FSS koden.

3.1.5 Naval Ship Code

Naval Ship Code (NSC) eller på svenska, regler för örlogsfartyg, skapades av International Naval Safety Association (INSA) för att lösa problemet med att de civila reglerna och konventionerna skapade av IMO inte mötte de krav som ställdes på örlogsfartyg. NSC skall ha samma nivå av säkerhet som SOLAS. Detta resulterade i att NATO december 2009 publicerade den sin tolkning av NSC i form av ANEP-77 (Allied Naval Engineering Publication). ANEP-77 är i utformad med militära ytfartyg i åtanke (*Naval Ship Code: Edition E Version 1*, 2014).

Några år senare (2012) skapades även Naval Submarine Code (NSubC) för ubåtar med Naval Ship Code som grund. NSubC togs fram av som ett initiativ av några medlemmar i International Submarine Safety Forum (ISSF). Delar av Naval Submarine Code publicerades av NATO i form av ANEP-102 som har informationssäkerhetsklassen NATO RESTRICTED (INSA, 2022).

3.1.6 RMS-NSC

RMS-NSC eller Regler militär sjöfart – Naval Ship Code är Försvarsmaktens tolkning/översättning av Naval Ship Code från International Naval Safety Association (INSA). Fartyg delas upp i tre kategorier A, B och C där Fartyg av typ C överensstämmer bäst med mindre ubåtar ”*Fartyg Typ C: Alla örlogsfartyg med ett sammanlagt antal personer ombord på mindre än 60 varav inte fler än 12 är passagerare*”.

RMS-NSC skall tillämpas för svenska örlogsfartyg som är ytfartyg med ett displacement större än 40 ton (RMS-F, 2013). Detta innebär att ubåtar inte direkt berörs av RMS-NSC, men RMS-NSC påverkar starkt RMS-F vilket i sin tur har en direkt påverkan på ubåtar.

Kapitel VI, brandskydd har målen ”*För effektivt brandskydd ska fartyget och dess utrustning utformas, tillverkas, underhållas och användas på ett sådant sätt att brand i möjligaste mån kan förhindras, upptäckas, begränsas och släckas samtidigt som väsentliga säkerhetsfunktioner bibehålls under och efter brandens utbrott*”(RMS-NSC, 2013).

Regel 9, Brandbekämpning berör brandbekämpning och system, där **underkapitel 22** handlar om fasta brandbekämpningssystem.

3.1.6.1 Fasta brandsläckssystem avsett för maskinrum och andra högriskutrymmen.

Ett fast brandsläckningssystem i maskinrum och andra högriskutrymmen som använder vatten som släckmedel kan bestå av:

- *Ett fast vattenspraybrandsläckningssystem som uppfyller bestämmelserna i **FSS-koden och IMO MSC/Circ. 1165**, eller annan standard som fastställts av SJÖI (RMS-NSC, 2013).*
- *Ett fast vattenbaserat undertryckningssystem enligt krav i punkt 32 avsett för kontrollstationer samt bostads- och arbetsutrymmen som uppfyller bestämmelserna i **IMO Resolution A.800** eller annan standard som fastställts av SJÖI (RMS-NSC, 2013).*

(Punkt 32.2.1 För fartyg av typ C: Omfattningen av ett vattenbaserat släcknings-, branddetekterings- och brandlarmsystem ska fastställas av administrationen. Systemet ska, om det monteras, vara av godkänd typ som uppfyller kraven i FSS-koden eller annan standard) (RMS-NSC, 2013).

- *Ett fast lokalt insatssystem för maskiner och utrustning som överensstämmer med bestämmelserna i **FSS-koden och IMO MSC/Circ. 913** eller annan standard som fastställts av SJÖI (RMS-NSC, 2013).*

(MSC/Circ. 913 är ersatt av MSC.1/Circ.1387)

Krav på att ett utrymmes användbarhet ska kunna bibehållas efter brand och efterföljande släckinsats kan ställas av Designansvarig (DesignA) och behöver därför beaktas. Ett fast brandsläckssystem som använder vattenånga som brandsläckningsmedel tillåts generellt inte. Ett sådant system kan i undantagsfall tillåtas av Försvarmaktens Sjöfartsinspektion (SJÖI), men enbart i begränsade områden om FSS-Koden samtidigt uppfylls.

Utrymmen med brandfarlig vätska, exempelvis färgförvarings-skåp, kan skyddas av ett vattendim- eller sprinklersystem som ger en vattentäthet på 5 l/m² per minut eller likvärdigt system godkänt av SJÖI. Systemet skall under alla omständigheter kunna manövreras utanför de utrymmet som skyddas.

3.1.6.2 Brandsläckningsanordningar i köksutrymmen och andra utrymmen

Fritöser och ventilationstrummor i kök skall vara utrustade med ett manuellt eller automatiskt brandsläckningssystem som är provat enligt internationell standard godkänt av SJÖI. En sådan godkänd standard är ISO 15371:2000 (ISO 15371:2000 är ersatt av ISO 15371:2015).

Huvudtavlor/elcentraler skall vara försedda med ett för utrymmet anpassat fast brandsläckssystem; här rekommenderas ett moduluppbyggt gasbrandsläckningssystem.

3.1.6.3 Ammunitionsförråd

I fristående eller inbyggda (utgör en integrerad del av fartyget) ammunitionsförråd ska ett sprinklersystem med ett vattenflöde motsvarande minst 24 l/m² per minut eller likvärdigt system godkänt av SJÖI vara installerat.

3.1.7 RMS – F

Regler för säkerheten ombord på örlogsfartyg baseras i stor utsträckning på civila internationella konventioner (SOLAS 74 och FSS-koden) och Transportstyrelsens nationella tolkningar (TSFS 2009:98). Då örlogsfartygens konstruktion och operationsmiljö skiljer sig från de civila fartygens har Försvarsmakten utarbetat särskilda tillämpningsbestämmelser i form utav Regler för militär sjöfart (RMS). Stora delar av *Regler för militär sjöfart – Fartyg och dess utrustning (RMS-F)* utgörs således av läshänvisningar till RMS-NSC och TSFS 2009:98.

Tabell 3.1 Krav som ställs på standarder utifrån RMS – F.

| Regler | | | |
|--------------|---|-----------------------------------|---|
| Namn | Kapitel | Ställer krav på/ rekommenderar | Anmärkning/förklaring |
| RMS - F 2013 | 6.14.1 Allmänt | TSFS 2009:98 | Undantag får göras enligt: TSFS 2009:98 Bilaga 1 Regel 17 (alternativ utformning av brandskydd) |
| TSFS 2009:98 | Regel 7: Fasta brandsläckningssystem för vattenspridning och vattendimma | MSC/Circ.1165 | Revised guidelines for the approval of equivalent water-based fire-extinguishing systems for machinery spaces and cargo pump-rooms |
| | | MSC/Circ.1237 | Tillägg till MSC/Circ.1165 |
| | | MSC/Circ.1269 | Tillägg till MSC/Circ.1165 |
| | | MSC.1/1385 | Scientific methods on scaling of test volume for fire test on water-mist fire-extinguishing systems |
| | | MSC.1/1386 | Tillägg till MSC/Circ.1165 |
| | Kapitel 8 Automatiskt sprinkler-, branddetekterings- och brandlarmsystem | A.800(19) | Revised guidelines for approval of sprinkler systems equivalent to that referred to in SOLAS regulation 11-2/12 |
| | | MSC.265 (84) | Tillägg till A.800(19) |
| | | MSC.284 (86) | Tillägg till A.800(19) |
| | Regel 10: Brandbekämpning | ISO 15371:2000 | Ersatt av ISO 15371:2015 |
| | | MSC.1/Circ.1433 | Unified Interpretation of SOLAS regulation II-2/10.6.4 and Chapter 9 of the FSS Code |
| | | ISO 15371:2015 | Fire-extinguishing systems for protection of galley cooking equipment |
| | | MSC.1/Circ.1387 | Revised guidelines for the approval of fixed water-based local application fire-fighting systems for use in category A machinery spaces |

Kapitel 6 i RMS-F berör ubåtar och reglerna uttrycks i huvudsak på ett funktionellt sätt och är endast i begränsad omfattning utformade som preskriptiva regler. Ubåtars brandskydd skall som minst motsvara den nivå som TSFS 2009:98 anger för lastfartyg tillsammans med de undantag och tillägg för ubåtar som anges i **Kapitel 6.14 Brandskydd** i RMS-F. Ubåtars brandskydd får utformas med den metod som anges i TSFS 2009:98 Bilaga 1 Regel 17 ”*Alternativ utformning av brandskydd*” (RMS-F, 2013).

Utrymmen med hög brand- och explosionsrisk och kritiska och/eller svåråtkomliga utrymmen skall förses med fast installerade brandbekämpningssystem. Fast installerade sprinkler och vattendimsystem skall vara uppdelade i sektioner för att begränsa skador på utrustning och minska förbrukningen av vatten.

3.1.8 Rules for classification of ships

3.1.8.1 Klassningssällskap

Klassningssällskap är organisationer inom främst sjöfarten som har till ansvar att bedöma, klassificera och övervaka säkerheten på nybyggda och befintliga fartyg. Sällskapen fastställer tekniska standarder för att kunna klassificera de fartyg som efter en teknisk bedömning uppfyller dessa krav. Fartygen som uppfyller kraven för klassificering får ett klassificeringscertifikat som visar deras säkerhetsnivå. För att säkerställa att kraven för klassificering hålls genomför sällskapet regelbundna inspektioner av fartygen under deras livstid. Exempel på stora klassningssällskap är Bureau Veritas (BV), Det Norske Veritas Germanischer Lloyd (DNV GL) och Lloyd's Register of Shipping (LR).

Enligt RMS-F skall nya fartyg över 40 ton byggas enligt klasstandarder och hållas i klass, klassningen skall genomföras av ett klassificeringssällskap anslutet till Naval Ship Classification Association (NSCA). Detta gäller inte för ubåtar men klassningsregler kan användas som riktlinjer för utformning, verifiering, provning, tillverkning med mera av delsystem, komponenter eller arrangemang (RMS-F, 2013).

3.1.8.2 Rules for classification of naval ships, submarines

Del 4 i Rules for classification of naval vessels av DNV GL från 2015 handlar om klassningsregler för undervattensfarkoster. **Kapitel 1** berör bemannade militära ubåtar med förmåga till rörlighet utan påverkan från ytan. Kapitlet berör konventionella ubåtar, som inte använder kärnreaktor drift.

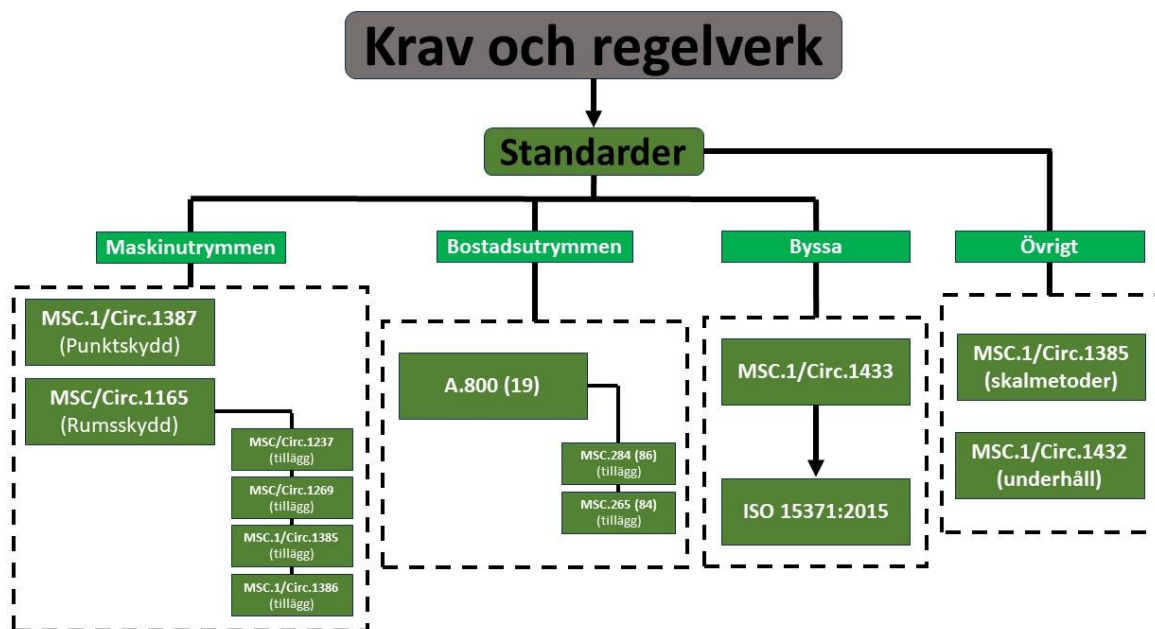
Sektion 15 berör brandskydd och brandsläckning och kräver att alla sektioner inom tryckskrovet skall vara utrustade så att en brand ombord släcks genom snabb och effektiv distribution av släckmedel till alla delar av utrymmet. Släckmedel med giftig eller narkotisk effekt är inte tillåten och hänsyn skall tas till risk för kvävning. Saltvatten (sjövattnen) är normalt tillåten och aktivering av släcksystemet får inte orsaka ”oacceptabla” tryckförändringar i utrymmet. Fasta brandsläcksystem får enbart aktiveras manuellt efter att all personal utrymt utrymmet (*RULES FOR CLASSIFICATION Naval vessels*, 2015).

3.1.8.3 Rules for classification of naval and naval support ships

Del 5, Kapitel 14 i Rules for classification of ships/ high speed, light craft and naval surface craft av DNV från 2005 innehåller klassningsregler för militära ytfartyg konstruerade i stål. **Sektion 10** berör brandsäkerhet. Maskinutrymmen kan utrustas med fast brandsläcksystem av typerna gas, lättskum eller sprinkler/vattendimma som uppfyller kraven i FSS-koden. För maskinrum över 500 m³ ombord på fartyg med över 50 meters längd skall föregående krav kompletteras med fasta brandsläcksystem med punktskydd enligt SOLAS Kapitel II-2. I utrymmen där sprängämnen förvaras skall ett sprinklersystem som avger ett vattenflöde motsvarande minst 32 l/m² per minut eller motsvarande vara installerat.

3.2 Standarder

Kraven och regelverken mynnar till stor del ut i kravställningar på olika standarder. Det finns två stora organisationer som ger ut dessa standarder. Den första är International Maritime Organization (IMO). De har en teknisk kommitté som bevakar säkerhetsfrågor ombord på fartyg, där brandsäkerhet är en av frågorna. Denna kommitté heter The Maritime Safety Committee och den fastställer och producerar alla MSC standarder (*Structure of IMO*, 2019).



Figur 3.2 Standarder kopplade till specifika utrymmen.

Den andra organisationen som publicerar standarder är International Organization for Standardization (ISO). Denna organisation är en mellanstatlig organisation som via sina medlemmar tar fram och utvecklar standarder inom både tekniska och icketekniska områden (*ISO - About Us*, 2023).

3.2.1 IMO MSC.1/Circ.1387

Standarden MSC.1/Circ.1387 omfattar riktlinjer för punktskydd med fasta brandsläcksystem i maskinutrymmen. MSC.1/Circ.1387 föreskriver att en aktivering av systemet inte ska orsaka att fartyget tappar manöverförmåga, vilket innebär att framdrivningsmaskineriet eller drivmedelsventiler inte får stängas av. I standarden berörs även var pumparna ska vara placerade och hur systemen ska övervakas. Systemet ska vara byggt och konstruerat så att det motstår de påfrestningar som kan uppstå i ett maskinrum. Dessa påfrestningar kan exempelvis vara temperaturförändringar och stötar (International Maritime Organization, 2010a).

I standarden finns en brandprovningmetod som systemet måste klara. Det finns två brandscenarier, med brandeffekter på 1 MW och 6 MW vilket är för att simulera en oljespraybrand i maskinutrymmet. Vid brandförsöken ska branden vara placerad på olika ställen i utrymmet med samma munstyckskonfiguration vilket ska säkra systemets släckförmåga. MSC.1/Circ.1387 är en uppdatering av MSC.1/Circ.913 (International Maritime Organization, 1999).

3.2.2 IMO MSC/Circ.1165

MSC/Circ.1165 omfattar riktlinjer för vattendimmunstycken i ett maskinutrymme som skyddas med ett rumsskydd. Krav ställs på vilka påfrestningar munstyckena ska klara av och hur de ska utformas. Dessa krav kopplas till de förutsättningar som finns i ett typiskt maskinrum i ett fartyg.

För samtliga krav finns det prov som avgör om munstycket är godkänt eller inte för bruk i maskinrum ombord på fartyg (International Maritime Organization, 2005).

MSC.1/Circ.1237, 1269 och 1386 är tillägg till MSC/Circ.1165. De är mindre ändringar som tillkommit efter revidering av MSC/Circ.1165.

MSC.1/Circ.1385 kopplar till MSC/Circ.1165 och omfattar skalningsregler som tillåter att ett system avprovat i en viss rumsvolym kan användas i större rumsvolymer (International Maritime Organization, 2010b).

3.2.3 IMO MSC.1/Circ.1432

Standarden MSC/Circ.1432 anger det minsta kravet på kontroll och underhåll av brandskyddssystem. Dokumentet nämner att detta är en grund för vilken underhållsplan systemet ska ha, vilket SOLAS Regulation II-2/14 kräver. Det som berörs är vad som ska kontrolleras och underhållas, och med vilka tidsintervall. Intervallen är; veckovis, månadsvis, kvartalsvis, årligt, vartannat år, vart 5:e år och vart 10:e år (International Maritime Organization, 2012).

I MSC.1/1516 finns mindre revideringar av texten och ett flödesschema för hur högtryckssystem ska kontrolleras, något som ger en tydlig överblick i hur systemet ska underhållas (International Maritime Organization, 2015).

3.2.4 IMO Resolution A.800 (19)

Standarden A.800 är *"Revised guidelines for approval of sprinkler systems equivalent to that referred to in SOLAS regulation 11-2/12"* omfattar vilka krav som ställs på ett vattendimmunstycke för användning i publika utrymmen, sovutrymmen och serviceområden ombord på fartyg. Upplägget är väldigt likt dokument MSC/Circ.1165 (International Maritime Organization, 1995).

I **kapitel 4** finns ett stort antal krav som systemet ska uppfylla. Dessa krav inkluderar bland annat rördimensioner, värmetålighet, korrosionsbeständighet med mera.

I **kapitel 5** redovisas provningsmetoder som svarar mot kraven som ställs i kapitel 4.

Avsikten med provmetoderna är att få brandprov som ska säkerställa släckförmågan på ett passagerarfartyg i bland annat hytter, korridor och butiker. Vissa av dessa brandprov är inte tillämpliga för miljön och förutsättningarna ombord på ubåtar då sådana utrymmen saknas. Andra brandprov är skapade för hytter och allmänna utrymmen, vilket kan vara relevant för en ubåt. Brandproven är väl utformade med tydliga acceptanskriterier i form av maximala taktemperaturer och maximalt tillåtna brandskador.

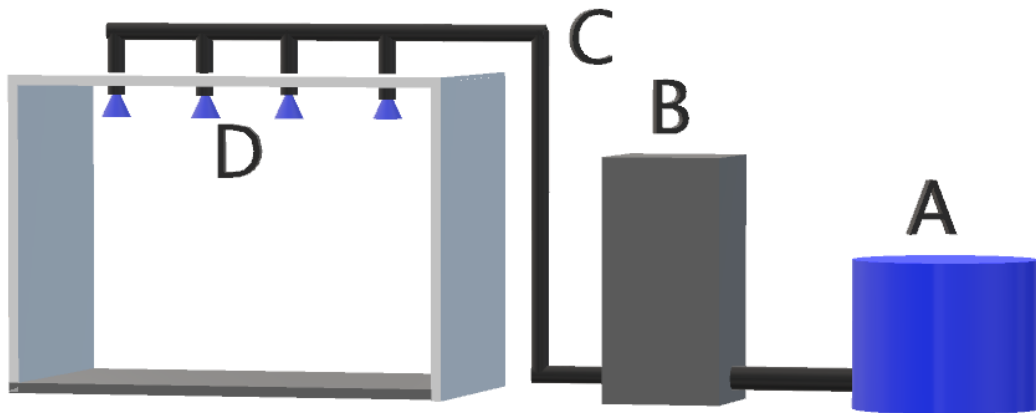
Till A.800 finns uppdateringar, dessa är MSC.284(86) och MSC.265(84). MSC.284(86) har endast uppdaterat ett mindre stycke i den ursprungliga texten (International Maritime Organization, U.Å.). MSC.265(84) innehåller större uppdateringar av brandprovningens metoder (International Maritime Organization, 2008).

3.2.5 ISO 15371:2015

International Organization for Standardization (ISO) har tagit fram en standard för hur säkerheten runt en fritös ska utformas. I standarden ISO 15371:2015 beskrivs de ingående komponenterna som finns i systemet. Här beskrivs också systemkraven och hur brandprovning ska utföras för fritöser (ISO, 2015). ISO 15371:2015 är den senaste upplagan. Innan denna har det funnits två till (2000 & 2009), men dessa är ersatta av den nuvarande. (ISO, 2015)

4 Vattendimma

4.1 Systemuppbyggnad för vattendimma



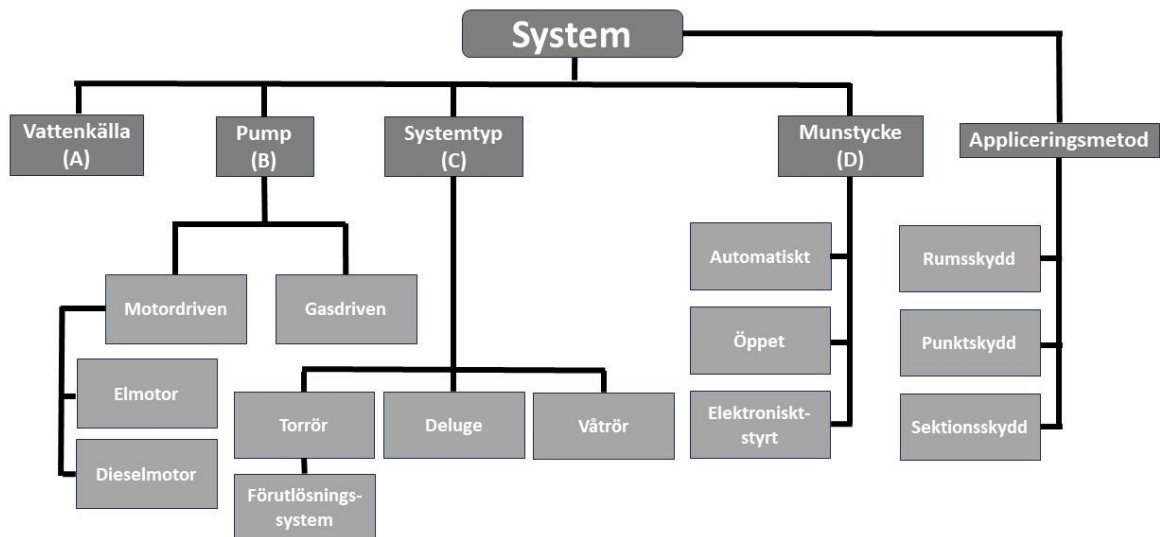
Figur 4.1 Översiktsbild av ett vattendimmsystem. (A. vattenkälla, B. pump, C. rör och D. munstycken)

Ett konventionellt vattendimmsystem är uppbyggt av flera komponenter som visas i Figur 4.1 och i Figur 4.2. Huvudkomponenten i systemet är pumpen (B) som skapar trycket i systemet och förser det med vatten. Pumpen kan arbeta inom olika tryckintervall; högt, mellan eller lågt, olika tryck ger vattendimman olika egenskaper.

Vattenkällan (A) som systemet nyttjar kan variera beroende på vilket system som väljs. Munstyckena längre ut i systemet har en liten diameter vilket kräver rent vatten eftersom orenheter kan täppa igen munstyckena och försämra deras prestanda. Från pumpen leds vattnet från vattenkällan vidare ut i systemet med högtrycksrör (C), dessa rör kan vara fyllda med antingen trycksatt gas (torrör) eller trycksatt vatten (våtrör). Rören leder vattnet ut till munstyckena (D) som distribuerar vattnet ut från systemet till omgivningen.

Det finns olika typer av munstycken som går att använda beroende hur man vill att dropparna ska skapas samt vilka egenskaper som systemet ska ha. Dessa munstycken har olika egenskaper baserat på den tilltänkta funktionen. Vattendimman kan appliceras i utrymmet på olika sätt. Det kan variera från att alla munstycken aktiveras för att skydda ett helt rum till att bara ett munstycke aktiveras. De ingående delarna och deras olika karaktär kommer att förklaras närmare nedan.

För mer om vattendimma och dess släckmekanismer se Bilaga 1 Släckmekanismer.



Figur 4.2 Sammanställning av de olika delkomponenterna

4.1.1 Munstycken

Nedan beskrivs olika typer av munstycken som ett vattendimsystem använder sig av.

4.1.1.1 Automatiskt munstycke

O'Connor på National Fire Protection Association (NFPA) (2022) beskriver olika varianter av munstycken som ett vattendimsystem kan använda sig av. Det första är ett automatiskt munstycke som aktiveras genom att ett värmekänsligt element (vanligtvis en glasbulb eller en smältlänk) når en given temperatur. När glasbulben når den bestämda temperaturen spricker den och vatten kan flöda ut ur munstycket. Det är enbart de munstycken som nås av brandens värme som aktiveras (O'Connor, 2022).



Figur 4.3 Ett automatiskt munstycke med glasbulb.

4.1.1.2 Öppet munstycke

Den andra varianten är ett öppet munstycke. Den har ingen glasbulb eller smältlänk som aktiverar vattenflödet, i stället är munstycket öppet och systemet aktiveras då den centrala pumpen aktiveras. För att aktivering måste ett brandlarm först detektera branden vilket i sin tur startar centralpumpen. Alternativt aktiveras systemet manuellt av en operatör. Denna typ av munstycke används enbart i ett delugesystem vilket är ett system som består av en grupp munstycken som aktiveras samtidigt (O'Connor, 2022).

4.1.1.3 Elektroniskt styrt munstycke

Den tredje varianten av munstycke som O'Connor beskriver är ett elektroniskt styrt automatiskt munstycke. Denna typ av munstycke kan programmeras till att stänga vattenflödet i munstycket med en ventil (O'Connor, 2022). Anledningen till att man vill ha ett automatiskt system är enligt T&B Electronic (2023) för att man enkelt ska kunna starta och stoppa flödet från munstycket.

4.1.2 Systemtyper

Utöver olika munstycken finns det även olika systemtyper. Dessa redovisas översiktligt nedan.

4.1.2.1 Delugesystem

Delugesystem använder sig av de tidigare nämnda öppna munstyckena. Eftersom systemet använder öppna munstycken är rören inte fyllda med vatten. Det är heller inget tryck i rören då systemet inte är aktivt. När system aktiveras kommer samtliga munstycken kopplat till en viss sektion att distribuera vatten (O'Connor, 2022). (Mer om sektioner redovisas senare i kapitlet).

4.1.2.2 Våtrörssystem

I sådant system är rören alltid fyllda med trycksatt vatten och kan således göra en snabb släckinsats eftersom systemet har ett konstant tryck som genererar direkt vattenflöde vid aktivering. När en sprinkler aktiveras kommer det direkt att flöda ut vatten från munstycket. Det är det vanligast förekommande systemet för inomhusanvändning (O'Connor, 2022).

4.1.2.3 Torrörssystem

Torrörssystemet, som till skillnad från våtrörssystemet, är fyllt med tryckluft eller kvävgas. Systemen används i miljöer med frysrisk. När ett sprinklerhuvud aktiveras strömmar gasen ut och trycket sänks och vattnet kan då strömma ut i systemet. Detta leder till att släckinsatsen fördröjs vilket innebär att det tar längre tid att få släckeffekt än jämfört med ett våtrörssystem (Runefors, 2018).

4.1.2.4 Förutlösningssystem

Denna typ av system är fyllt med tryckluft eller kvävgas och är en variant av ett torrörssystem. Förutlösningssystemet kombinerar både automatiska munstycken och ett separat detektionssystem. När detektionssystemet detekterar en brand släpps vattnet ut i rörsystemet, men för att vattnet ska flöda ut krävs även att de automatiska munstyckena aktiveras av värmen från en brand. Systemtypen används ofta i utrymmen där utströmning av vatten kan få stora konsekvenser (Runefors, 2018).

4.1.3 Droppgenerering

O'Connor beskriver att det finns flera metoder att generera vattendimma på, vilka är uppdelade i två olika kategorier. Den första kategorin använder enbart vatten för att skapa vattendimma och den andra metoden använder sig av två separata media, i detta fallet vatten och gas (O'Connor, 2022).

4.1.3.1 *Hydraulisk finfördelning*

Genom att låta vatten flöda med ett högt tryck igenom små hål i munstycket skapas en finfördelad dimma då den når ut till atmosfärstryck. Dropparna är finfördelade och mycket små vilket innebär att de i en viss mån kan färdas med luftströmmarna runt i rummet (O'Connor, 2022).

4.1.3.2 *Mekanisk finfördelning*

Mekanisk finfördelning innebär att vatten från ett munstycke träffar en metallplatta. När vattenstrålen träffar plattan delas vattnet upp som en spray. Metoden liknar den som nyttjas hos konventionella vattensprinklers, skillnaden är att konventionella sprinklers har en betydligt större droppstorlek som ligger runt 1000–2000 µm relativt till vattendimsystem där de flesta har droppstorlekar mellan 50–250 µm. Vattendropparna skapas när vattenstrålen träffar spridarplattan vilket inte kräver ett lika högt tryck som andra genereringsmetoder. För att fungera effektivt kräver systemet ett arbetstryck på mellan 5 – 10 bar (Arvidson, 2020).

4.1.3.3 *Vibration*

Vattendimma kan även skapas genom vibration. Metoden bygger på att ett tunt skikt med vatten sprids över en platta som vibrerar med hög frekvens. Vibrationerna bryter upp vattnet vilket resulterar i mycket små vattendroppar som kan bli mindre än 10 µm i diameter (Arvidson, 2020). Droppar skapade genom vibration är så små att de behöver transporteras av en gas, vanligtvis kvävgas (Arvidson, 2020).

De mindre vattendropparna är mer känsliga för luftströmmar i rummet, speciellt i jämförelse till de större droppar. Detta innebär att luftströmmar sällan påverkar konventionella sprinklersystem.

4.1.3.4 *Överhettat vatten*

Denna typ av droppgenerering bygger på att vatten hettas upp i ett tryckkärl. Vattnet värms upp till över normal kokpunkten och eftersom vattnet befinner sig i ett slutet tryckkärl ökar trycket. När ett munstycke aktiveras flödar överhettad ånga ut i systemet och till munstyckena. När vattenången kommer ut i rummet som har atmosfärstryck sker en tryckförändring hos vattnet och bidrar till att en del av vattnet bildar en dimma som sprider sig i rummet (Arvidson, 2020).

4.1.3.5 *Pneumatisk finfördelning*

Det finns även system där vatten och en gas, vanligtvis kvävgas, leds till munstycket i separata rör. När vattnet och gasen möts i munstycket expanderar gasen vilket finfördelar vattnet. Detta ger små droppar, speciellt om man använder större del gas relativt till vattenmängden (Arvidson, 2020).

4.1.4 Systemtryck

Konventionella vattendimsystem använder olika vattentryck för att transportera vatten i systemet och finfördela det vid munstyckena. Enligt handboken utgiven av Society of Fire Protection Engineers (SFPE) finns det tre olika systemklassificeringar. (J. R. Mawhinney & Back III, 2016)

- Lågtryckssystem, har ett arbetstryck på upp till 12.1 bar (175 psi).
- Mellantryckssystem, har ett arbetstryck mellan 12.1 – 34.5 bar (175 – 500 psi).
- Högtryckssystem, har ett arbetstryck som är över 34.5 bar (500 psi).

De flesta högtryckssystem har ett arbetstryck mellan 60 och 120 bar (870 – 1740.5 psi).

4.1.5 Pumpar

För att skapa tryck och pumpa ut vattnet i systemet finns ett antal olika lösningar. Enligt handboken SFPE (J. R. Mawhinney & Back III, 2016) finns det tre huvudsakliga sätt att trycksätta systemet; med en elmotordriven pump, en gasdriven kolv pump eller dieseldriven pump.

4.1.5.1 Elmotordriven pump

Den första pumpen som tas upp drivs av elmotorer. Den fungerar genom att elmotorer i pumpenheten driver pumpen och genererar tryck. Eftersom trycket regleras av elmotorer kan systemet ha samma tryck under hela drifttiden vilket medför att vattendropparnas storlek inte förändras. Då pumpen är eldriven kan vattenpåföringen enkelt avbrytas genom att stänga av pumpen på en kontrollpanel (J. R. Mawhinney & Back III, 2016).

4.1.5.2 Gasdriven kolvump

Den andra pumpen som nämns i SFPE är den gasdrivna kolvumpen som trycksätter systemet. Gasen som driver pumpen kan variera mellan olika system där de vanligaste drivgaserna är trycksatt luft eller kvävgas (Arvidson, 2014). Drifttiden styrs av mängden drivgas som är beroende av antalet flaskor med gas. Mängden gas som krävs för systemet bestäms utifrån volymen på utrymmet och systemets tänkta varaktighet. Släckvattnet förvaras i ett tryckkärl eller vattentank.

Denna typ av system är därför helt självförsörjande vilket innebär att det inte behöver extern vatten- och eltillförsel. Fördelen är att pumpen kan aktiveras även om det är strömavbrott (J. R. Mawhinney & Back III, 2016).

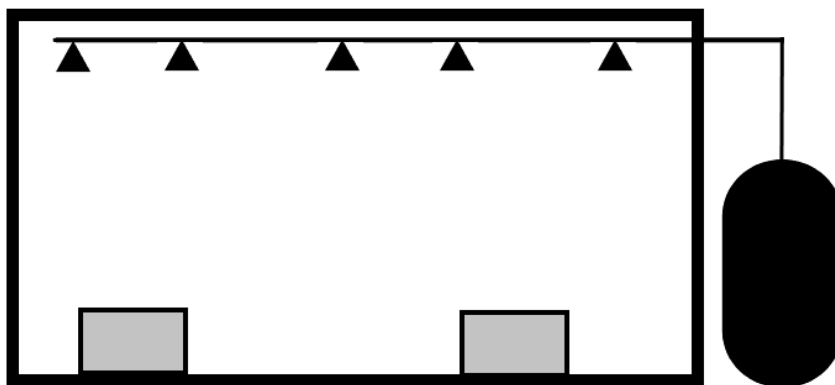
4.1.5.3 Dieseldriven pump

Den tredje pumpen som tas upp i SFPE är en dieseldriven kolvump. Denna typ av pump är relativt lik den elmotordrivna pumpen i hur den genererar tryck. Eftersom den drivs diesel kan den operera med konstant tryck under hela applicerings tiden, dvs den har inget tryckfall som den gasdrivna pumpen har. En nackdel men kolvump är om pumpen startar utan att något av munstyckena är öppna kommer trycket att byggas upp tills antingen rören eller motor går sönder (J. R. Mawhinney & Back III, 2016).

4.1.6 Appliceringsmetod

SPFE handboken menar att det finns fyra vanliga appliceringsmetoder för vattendimma. Vid installation av systemet kan man välja att göra det enligt olika principer beroende på vad och på vilket sätt man vill skydda utrymmen eller utrustningen (J. R. Mawhinney & Back III, 2016).

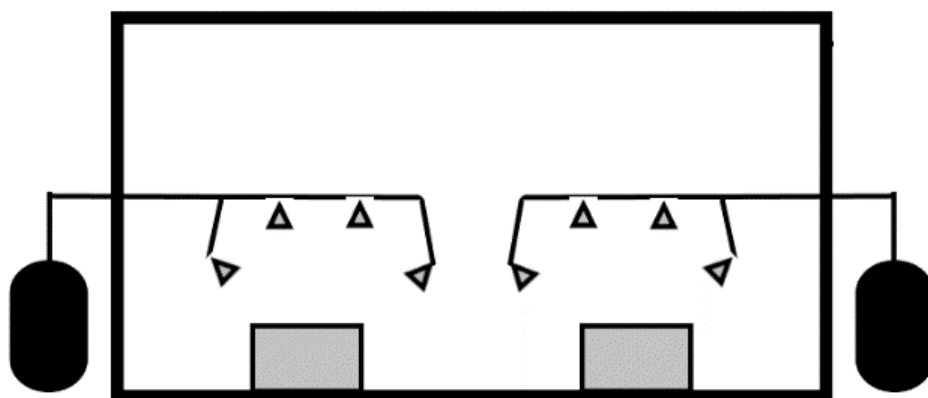
4.1.6.1 Rumsskydd



Figur 4.4 Rumsskydd.

Rumsskydd eller på engelska ”total compartment application” (TCA) innebär att ett helt utrymme som till exempel en hytt eller ett maskinrum skyddas genom aktivering av samtliga munstycken (J. R. Mawhinney & Back III, 2016).

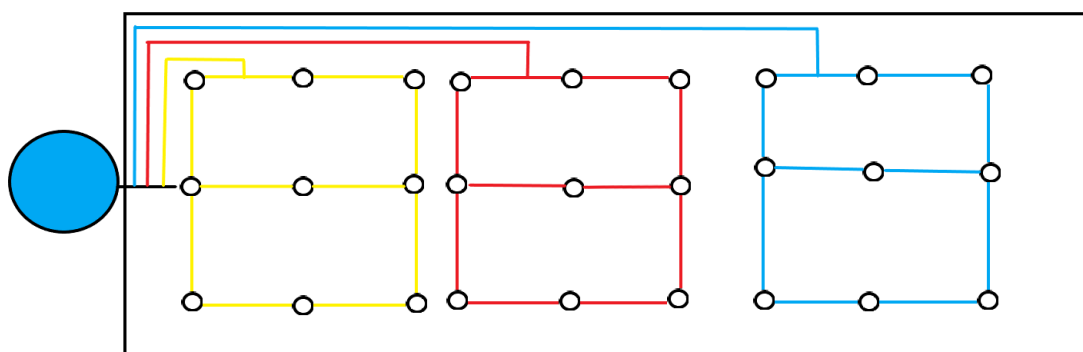
4.1.6.2 Punktskydd



Figur 4.5 Punktskydd.

Det andra appliceringsmetoden som berörs är punktskydd, på engelska “local application”. Den skiljer sig från rumsskydd i den mening att man enbart placerar munstycken över eller runt ett visst riskområde/objekt. Det kan vara en maskin eller annan utrustning där förhöjd brandrisk finns. Man kan även använda punktskydd för att skydda kritisk utrustning. Anledningen till att man väljer att installera ett punktskydds-system är att man eventuellt vill minska brandspridning mellan vitala maskiner och andra områden samt tidigt kunna kraftsamla mot en brand vid ett särskilt objekt (J. R. Mawhinney & Back III, 2016)

4.1.6.3 Sektionsskydd



Figur 4.6 Sektionerat system.

Den tredje metoden kallas sektionsskydd, på engelska “zoned application”. Denna appliceringsmetod innebär att vattendimmsystemet delas upp i sektioner för att minska vattenanvändningen. Sektionerna har branddetektorer kopplade till varje enskild del. När en branddetektor larmar aktiveras vattendimman i den sektionen. Om branden skulle sprida sig aktiveras de andra sektionerna då branden detekteras där (J. R. Mawhinney & Back III, 2016).

4.2 Andra vanligt förekommande släcksystem på fartyg

På fartyg kan fler brandsskyddssystem än vattendimma nyttjas. De olika systemen har fördelar och nackdelar. I detta avsnitt redovisas de olika systemen och deras egenskaper.

4.2.1 Gassläcksystem

Det finns flera typer av gaser som används för brandsläckning på fartyg. En typ av dessa gaser var Halon 1301 vars användning var väl utbredd ombord på fartyg. Efter att Montrealprotokollet skrevs på 1987 och trädde i kraft 1989 har användningen minskat kraftigt då nyinstallationer förbjöds.

I dagsläget är koldioxid (CO₂) en vanligt förekommande släckgas i maskinrum ombord på handelsfartyg. Koldioxiden förvaras i trycksatta flaskor där ventiler öppnas manuellt för att släppa ut gasen i utrymmet. När koldioxiden tillförs till utrymmet sänks syrekoncentrationen. Utöver en minskad koncentration ökar värmekapaciteten hos luftblandningen. Om tillräckligt mycket CO₂ appliceras i flamzonen kommer den termiska förlusterna att överstiga värmeöverföringen. Det medför att temperaturen hos flammen sänks. Till slut slocknar branden när den inte kan skapa tillräckligt mycket värme för att upprätthålla de kemiska reaktionerna (Harrington & Senecal, 2016). För att kunna nå en tillräckligt hög koncentration är det viktigt att utrymmet är tätt och att alla luckor stängs innan systemet aktiveras.

En stor nackdel med koldioxiden är att den är dödlig för människor vilket innebär stora risker för de besättningsmän som befinner sig i utrymmet. För att försäkra sig om att ingen är kvar finns akustiskalarmdon (sirener) för att varna besättningsmännen och ge dem tid att utrymma.

Först när utrymmet är utrymt och luckorna stängda kan systemet aktiveras och släckinsatsen påbörjas. Dessa moment leder till att det tar tid, från första indikation på brand tills gasen släpps ut och kan börja verka.

Novec 1230 är ett vanligt släckmedel som blev populärt efter förbudet mot Halon. Novec 1230 ingår i en kategori som kallas för "clean agent" släckmedel. Kategorin är i sin tur indelad i två subkategorier där den första kategorin är inertgaser som koldioxid, kvävgas, argon och blandningar av dessa gaser. Den andra kategorin är halogenerade kolväten, det är i denna grupp som vi finner Novec 1230 (Forssell & DiNenno, 2016).

Dessa typer av föreningar delar många egenskaper med varandra men även med Halon. Några av dessa egenskaper är att släckmedlet varken leder el eller lämnar restprodukter efter att den har aktiverats. Systemuppbyggnaden som levererar gasen till rummet är väldigt lika systemuppbyggnaden för Halon. Halon har bäst släckeffektivitet jämfört med de gaser som tidigare nämnts. En lägre släckeffekt leder till att en större mängd gas krävs för få likvärdig effekt. Samtliga av dessa medel har till skillnad från Halon ingen inverkan på ozonlagret, vilket var anledningen till att Halon förbjöds 1989 (Forssell & DiNenno, 2016).

En nackdel med alla typer av gassläcksystem är att det blir en tryckuppbyggnad i utrymmet som det påförs i. Tryckökningen kan få konsekvenser för ubåtens strukturella integritet. Det är således en viktig aspekt att undersöka tryckökningen från dessa typer av släcksystem om ett sådant system skulle installeras på en ubåt.

4.2.2 Konventionella sprinklers

Konventionella sprinkler och vattendimma har liknande systemutformning och appliceringsmetoder. Den stora skillnaden mellan konventionella sprinkler och vattendimma är systemtrycket.

Konventionella sprinklers arbetar med lägre tryck, vanligtvis runt 4–12 bar (Runefors, 2018).

I regel sitter det en värmekänslig glasbulb eller smältlänk på sprinklerhuvudet som aktiveras av värmen från en brand, så att vatten börjar att flöda. När vatten flödar sänks trycket vilket systemet känner av och startar pumparna. Ett lägre vattentryck medför att vattendropparna blir större än i ett vattendimsystem, större vattendroppar kan inte kyla brandgaserna lika effektivt som små. Eftersom droppstorleken är större faller vattendropparna snabbare mot branden och förångas inte lika snabbt. Detta medför att dropparna kan nå bränsleytan vilket i sin tur minskar risken att branden sprider sig.

4.2.3 Skumsläcksystem

Skumsläcksystem har fast monterade skummunstycken med vatten och skumvätska anslutet samt möjlighet till luftinblandning. När vatten, skumvätska och luft blandas bildas ett skum med låg densitet. När skummet appliceras bildar det ett skumtäck över vätskeytan. Skum är därför ett effektivt alternativ mot pölbränder i brandfarliga vätskor eftersom skummet begränsar brandens syretillförsel (Särdqvist, 2013). Bränsleångorna kan således inte blanda sig med nytt syre och branden slocknar (Scheffey, 2016).

5 Tidigare studier och försök

5.1 Inledning

Konstruktion av ubåtar och ubåtsverksamhet generellt är så gott som helt omgärdat av sträng sekretess vilket påverkar möjligheten att med hjälp av tillgängliga öppna källor hitta information om, i vårt fall, andra nationers vägval gällande konstruktion och användande av vattendimma ombord. Men det finns vissa undantag där försök och studier genomförts på ubåtar, ombord på örlogsfartyg eller med förutsättningar som till olika grad påminner om den ombord på ubåtar. Dessa studier sammanfattas nedan:

5.2 Tidiga studier genomförda av US Navy

5.2.1 Inledande studier

Enligt en sammanställning av vattendimmas utveckling i den amerikanska flottan från 1999 inleddes i slutet på 1970-talet studier i USA gällande hur vattendimma kunde släcka bränder genom kylning av brandgaser. Studierna var inledningsvis numeriska (flödesberäkningar i tre dimensioner) men validerades senare genom experiment på Taylor Ship Research & Development Center för att utveckla koncept för brandsläckning ombord på ubåtar. Försöken resulterade i begränsad framgång när det gällde att släcka bränder i brännbar vätska i simulerade maskinrum och torpedrum på ubåt. Enligt sammanställningen hade vattendimma inte tillämpats på ubåt vid tidpunkten, trots goda resultat vad gäller kylning och brandsläckning i ubåtsmiljö (Darwin m.fl., 1999).

5.2.2 Småskaleförsök

År 1990 inleddes småskaleförsök vid Naval Research Laboratory i Chesapeake Beach. Försöken genomfördes i ett 3x3x2,4 m stort utrymme utfört i stålplåt. Brandscenarierna inkluderade exponerade och dolda bränder i träpallar samt i brännbar vätska. Slutsatserna från försöken var att det är enklare att släcka större bränder än små på grund av att vattendimman trycker undan mer syre när den förångas och expanderar (inerting). Andra slutsatser var att dolda bränder är svåra att släcka, men begränsas i storlek då den kvävs av mättad vattenånga (självslocknar när syrekoncentrationen sjunker till en nivå som förhindrar vidare förbränning).

Som tillägg till dessa försök genomfördes försök på Denver Research Institute finansierade av den amerikanska flottan då oro fanns att en ny torpedmotor skulle kunna generera vätgas. Försöken visade att vattendimma skulle kunna fungera som skydd mot explosioner förutsatt att systemet fick möjlighet att agera proaktivt, det vill säga systemet aktiverades innan explosionen. (Darwin m.fl., 1999).

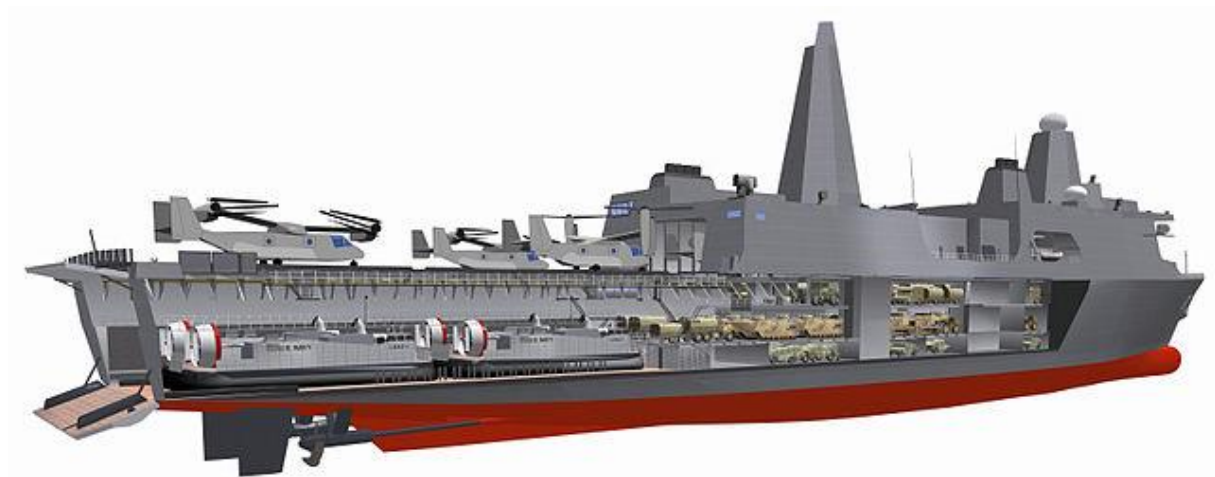
5.2.3 Fullskaleförsök

Småskaleförsöken gick senare över i fullskaleförsök ombord på den uttrangerade USS Shadwell i Mobile, Alabama. Försöken genomfördes i ett utrymme ombord med två våningar och en total volym på 960 m³. Provbränderna hade en effektutveckling på upp till 10 MW och genomfördes med både dieselolja och heptan. För scenarier med dolda bränder byggdes en fullskalemodell upp med simulerade dieselmotorer, reduktionsväxlar, gasturbiner och annan utrustning. Försöksresultaten visade att tiden som krävdes för att släcka bränderna över lag var inom en minut med undantag för små dolda bränder. Temperaturen i utrymmena sjönk även från 500 °C till 50 °C inom några få sekunder efter att vattendimmsystemet aktiverats. Sammanfattningsvis visade fullskaletesterna att vattendimma var ett godtagbart alternativ till Halon 1301 ombord på örlogsfartyg (Darwin m.fl., 1999).

5.2.4 Påverkan på elektrisk utrustning

En annan fråga som den amerikanska flottan ville ha svar på var vattendimmas påverkan på strömsatt elektrisk utrustning. Den amerikanska flottan finansierade därför en undersökning på laboratoriet för tillämpad fysik vid Johns Hopkins Universitet med målen att ta reda på risken för utrustnings- och personskador vid aktivering av ett vattendimmsystem i en miljö med strömsatt elektrisk utrustning.

Utrustningen som valdes ut för försöken var trefas 450V växelströmsmotorer och utrustning för motorstyrning samt el-centraler. Utrustningen valdes ut för att vara representativ för utrustningen ombord på de planerade amfibiestridsfartygen av San Antonio-klass (LDP-17). Även de munstycken som användes var tänkta att senare användas på San Antonio-klassen. De flesta av försöken genomfördes med sötvatten men några få genomfördes även med bräckt vatten och salt sjövattnet. Vid försöken mättes strömläckaget från fas till fas och från fas till inkapsling.



Figur 5.1 Animering av fartyg av San Antonio-klass (bild hämtad ifrån Wikimedia Commons, bild: Naval Sea Systems Command)

Försöken visade att risk för elstötar enbart fanns då pölar med vatten uppstått på utrustningens yta. Slutsatserna från studien var att sannolikheten att orsaka en risk för elstötar var låg och att personal i ett utrymme med strömsatt utrustning inte behöver evakuera innan aktivering av vattendimma (Darwin m.fl., 1999).

5.2.5 Skydd mot övertändning

Inom projektet "Damage Control-Automation for Reduced Manning" övervägdes vattendimma som ett släcksystem för hela fartyget och som punktskydd för skydd mot övertändning samt för brandbegränsning. Försöken genomförda i utrymmen med begränsad syretillförsel och låg takhöjd visade att övertändning kunde förhindras trots begränsad vattenåtgång och med glest placerade munstycken. Försök med munstycken placerade över dörröppningar påvisade goda resultat och begränsade temperaturerna till 150 °C. Skydd mot övertändning med munstycken placerade i dörröppningar resulterade även i en begränsning av brandspridning, då brandutrymmet kyls ner så pass att branden inte sprids till intilliggande utrymmen. Lufttransport in och ut ur brandutrymmet hindras även, vilket i kombination med kylningen av brandgaserna ut ur brandutrymmet kraftigt begränsar rökspridningen till intilliggande utrymmen (Darwin m.fl., 1999).

5.3 Hyttförsök för korvett av Visbyklass

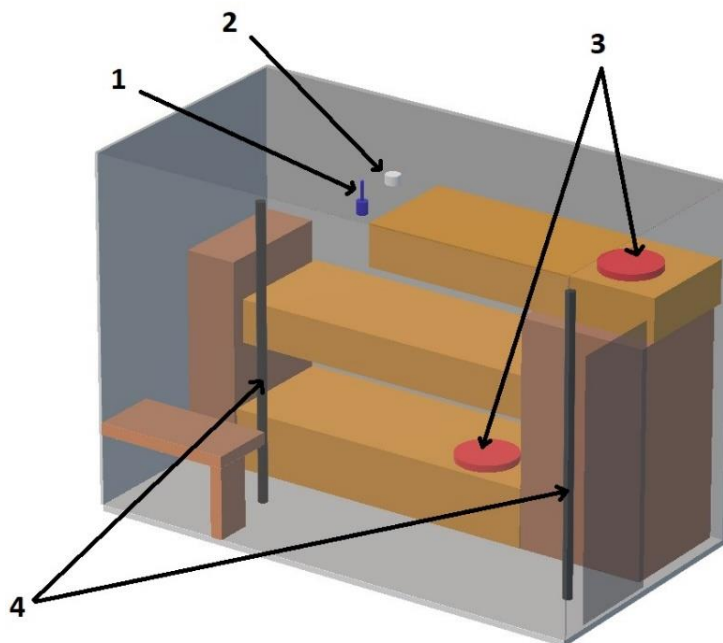
När korvetterna av Visbyklass konstruerades stod brandskyddet ombord inför speciella problem; fartygen är byggda med skrov av kolfiberkomposit och har många små utrymmen. Därför behövdes en brand släckas snabbt för att hindra spridning av brandrök. En kombination av passiva och aktiva system valdes ut där ett gassläcksystem valdes för maskinrum och vattendimma för besättningsutrymmen (Arvidson, 2003).



Figur 5.2 Animering av korvett av Visbyklass (bild hämtad ifrån Wikimedia Commons, bild: från boken "Örlogsfartyg")

För att verifiera brandskyddet genomfördes försök av Försvarets Materielverk (FMV) och Kockums AB (nu Saab Kockums AB) vid Statens provningsanstalt (SP, nu RISE) i Borås. Försöken genomfördes i en identisk kopia av en hytt ombord. Tre olika försöksserier genomfördes, en för detektion, en för vattendimma och ett övertändningstest.

5.3.1 Hytten



Figur 5.3 Skiss på hytt ombord på Visbykorvett. (1.munstycke, 2.detektor, 3. plats för brännare och 4.termoelementtråd)

Hyttens innermått var 3200 mm djup, 1823 mm bred och hade en takhöjd på 3100 mm. Väggarna och taket var av Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) sandwichpaneler målade med brandskyddsfärg motsvarande de som fartygen byggts av. I hytten fanns tre våningssängar med flamskyddade madrasser, ett klädskåp, skrivbord, hyllor och en soptunna.

5.3.2 Släcksystemet

Vattendimsystemet i hytten använde DN 12-rör i rostfritt stål kopplat till ett munstycke (1) monterat 260 mm under taket. Munstycket var tillverkat av Marioff Corporation Oy och av typen *Hi-Fog 1B 1MB 6MB 100A* och använde en 2 mm glasbulb av typen ”quick response” med en aktiveringstemperatur på 57 °C. Munstyckets K-faktor var 1,45 (L/min) /bar^{1/2} och systemet hade ett arbetstryck på 120 bar vilket gav ett vattenflöde på 15,9 L/min. För att simulera en verklig aktivering av systemet hade pumpen även en fördröjning på 10 sekunder.

5.3.3 Försöken

Tre olika försök genomfördes med förutsättningar enligt Tabell 5.1. Bränderna (3) startades i sängarnas madrasser med hjälp av en gasolbrännare med en effekt på 30 kW som stängdes av vid släcksystemets aktivering.

Tabell 5.1 Försöksupställning.

| Försök | Aktivering | Plats | Dörr |
|--------|------------|-----------------|--------|
| 1 | Automatisk | Säng längst ner | Stängd |
| 2 | Automatisk | Säng längst ner | Öppen |
| 3 | Automatisk | Säng högst upp | Öppen |

För att mäta temperaturen i väggar och tak monterades termoelement i förskurna fåror som sedan täcktes med lim för att göra ytan plan. Två termoelementträd (4) med 15 termoelement vardera placerades inuti hytten för att mäta gastemperaturen med termoelementen placerade på vertikala intervaller från 50 till 300 mm. Ett termoelement placerades vid skrivbordet och det andra nära dörröppningen.

Ljusarmatur installerat i taket hindrade en optimal placering av munstycket vilket medförde en placering längre ner än optimalt (260 mm under taket). Då farhågor fanns att placeringen skulle påverka aktiveringstiden installerades speciella termoelement med egenskaper som skulle representera de hos en glasbulb. De vertikala avstånden från taket var 35 mm, 85 mm, 135 mm, 185 mm, 235 mm och 285 mm.

5.3.4 Resultat

Resultaten från försöken i Tabell 5.2 visar att temperaturen i de fall branden var placerad i den undre sängen knappt nådde över 100 °C vid några av mätpunkterna. Dock kan det vara värt att notera att temperaturerna från de två högst placerade termoelementen i termoelementträdet vid skrivbordet ej registrerades men sannolikt var den faktiska temperaturen något högre.

I fallet då branden var placerad i den övre sängen (försök 3) uppnåddes väsentligt högre taktemperaturer inom loppet av enstaka sekunder vilket medförde en snabb aktivering av vattendimsystemet. Vid jämförelse av fallen med branden placerad i nedre sängen men med öppen och stängd dörr (försök 1 och 2) kan noteras att temperaturerna är ungefär lika höga i båda fallen vid samtliga mätpunkter, samtidigt som aktiveringstiderna skiljer sig markant. I fallet med stängd dörr aktiveras sprinklersystemet över fem minuter tidigare än vid det med öppen dörr trots i övrigt samma förutsättningar.

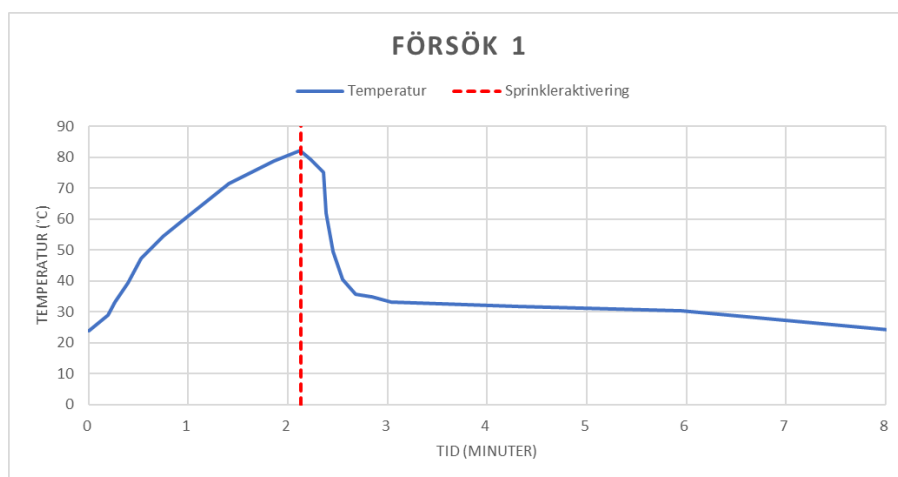
Tabell 5.2 Resultat från försök.

| Försök | Beskrivning (placering/ dörrläge) | Aktiveringstid (min:ss) | Maxtemperatur (°C) termoelement 1 (dörröppning) | | Maxtemperatur (°C) termoelement 2 (skrivbord) | | Maxtemperatur (°C) (25 mm under tak) | |
|--------|---|----------------------------|---|----------|---|----------|---|----------------|
| | | | Takhöjd | Golvhöjd | Takhöjd | Golvhöjd | Centrerat i hytten | Över sängar |
| 1 | (nedre/stängd) | 02:08 | 82 | 33 | 93 | 34 | 103 | 93 |
| 2 | (nedre/öppen) | 07:28 | 102 | 31 | 93 | 35 | 101 | 101 |
| 3 | (övre/öppen) | 00:30 | 216 | 22 | 145 | 24 | 432 | 432 |

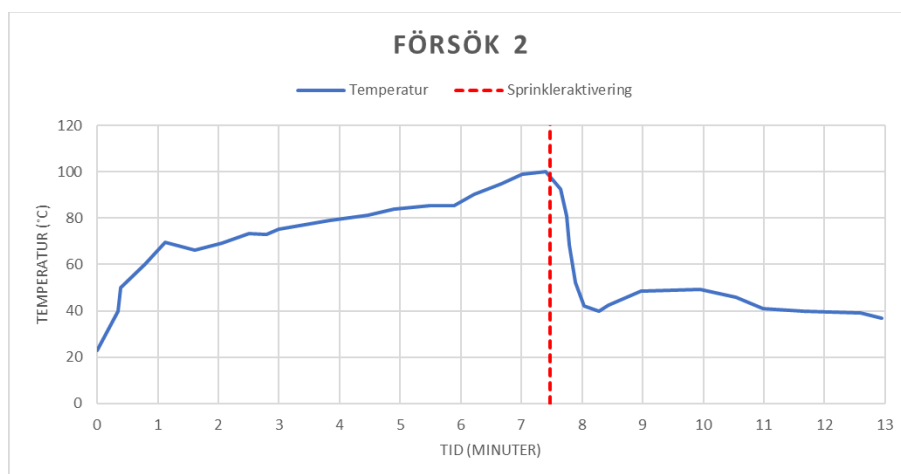
Som referens kan temperaturerna vid övertändningsförsöket användas och där nådde mätningarna på termoelementtrådet vid dörröppningen (termoelement 1) upp till mellan 700 °C och 800 °C på runt 17 minuter då branden släcktes manuellt utifrån.

I samtliga fall leder aktiveringen av munstycket till en snabb temperatursänkning och temperaturerna är nere på säkra nivåer inom 30 till 60 sekunder oberoende av mätpunkt i hytten.

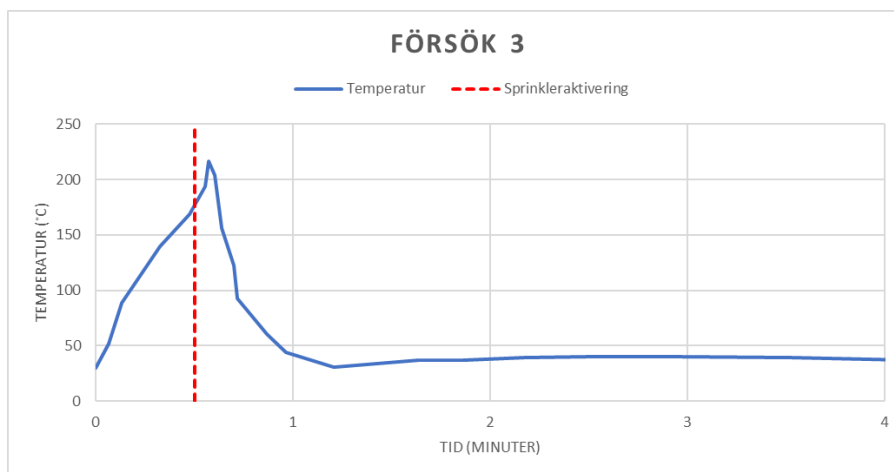
Temperaturerna i Figur 5.4, Figur 5.5, Figur 5.6 och Figur 5.7 är de högsta uppmätta i termoelementet vid dörröppningen.



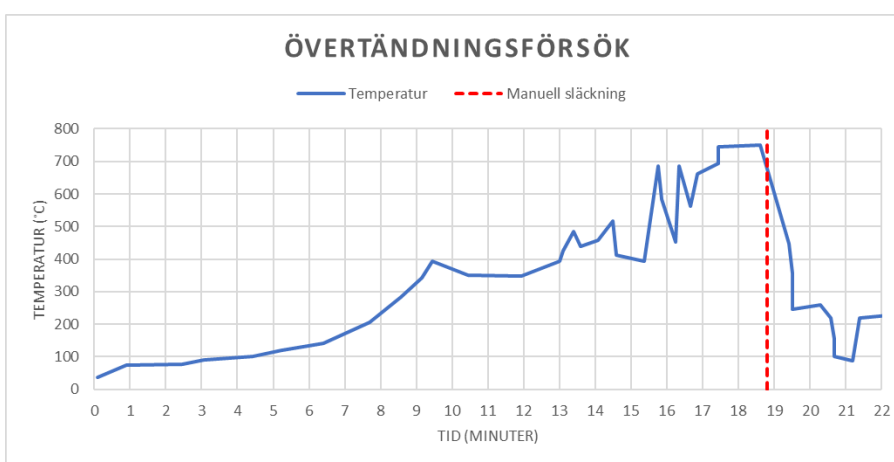
Figur 5.4 Temperatur/tid-kurva från försök 1 (nedre/stängd).



Figur 5.5 Temperatur/tid-kurva från försök 2 (nedre/öppen).



Figur 5.6 Temperatur/tid-kurva från försök 3 (övre/öppen).



Figur 5.7 Temperatur/tid-kurva från övertändningsförsöket.

När det gäller placeringen av munstycket visade mätningarna med det anpassade termoelementet med syfte att simulera en glasbulb att mätpunkten närmast taket ”aktiverades” först av alla vid samtliga försök. Tidsskillnaden för aktivering vid de olika mätpunkterna var som minst i försök 1 med en tidsskillnad på 11 sekunder och som störst i försök 2 med en tidsskillnad på 28 sekunder. Slutsatsen är att en placering så nära taket som möjligt är optimalt, men att en lägre placering kan vara tillräckligt bra om det krävs på grund av yttre förutsättningar.

Sammanfattningsvis visade försöken att ett släcksystem av typ vattendimma fungerade mycket väl för att släcka och begränsa en brand som uppstår någonstans i hytten.

5.4 New Technologies for Fire Suppression on Board Naval Craft (FiST)

“*New Fire Suppression Technologies on Board Naval Ships (FiST)*” (Rahm m.fl., 2014) var ett multinationellt samarbetsprojekt mellan Kanada, Nederländerna och Sverige. Projektet hade tre fokusområden:

1. Fasta brandsläckningssystem.
2. Bärbara, manuella brandsläckningssystem.
3. Brandsläckning ombord på ubåtar.

För fasta brandsläckningssystem genomfördes fullskaleförsök med och utan påverkan av stridsskador samt försök i ammunitionsdurkar. Teknikerna inom de första områdena (fasta och bärbara, manuella brandsläckningssystem) studerades ytterligare för att kunna anpassas till miljön och förhållandena ombord på en ubåt.

5.4.1 Vattendimmas effektivitet i miljöer med stridsskador

För att kunna studera vattendimmas effektivitet i miljöer med stridsskador togs ett antal förväntade skadescenarier fram:

- Penetrationsskador orsakade av splitter med mera.
- Deformation och brott av rör på grund av direkt tryckvåg eller deformation.
- Förlust av funktion på grund av tryckvåg.
- Brand i brännbara material på grund av värmebelastning från explosion eller brand.

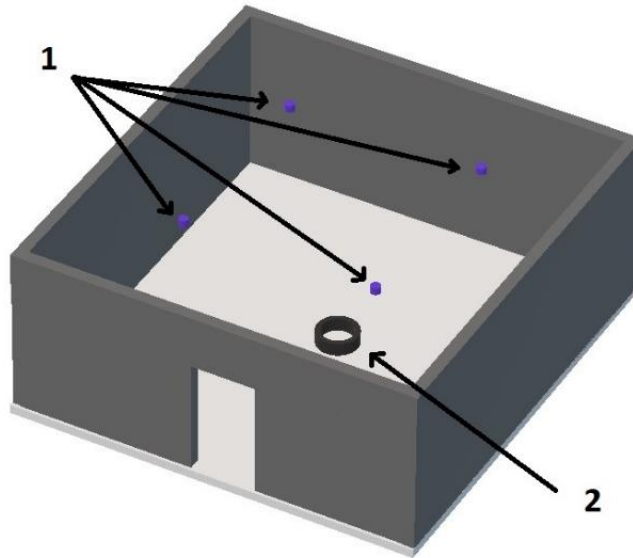
(Rahm m.fl., 2014)

2008 genomförde den nederländska organisationen för tillämpad naturvetenskaplig forskning (TNO) en serie sprängförsök på ett vattendimmsystem av typ Marioff HI-FOG (Hiltz m.fl., 2015). Försöken genomfördes i en 290 m³ sprängkammare vid laboratoriet för ballistiska studier. Systemet bestod av 20 munstycken med tillhörande rör med en diameter på 30 mm.

Det uppstod inga synliga skador vid de första fyra försöken där sprängningar genomfördes med motsvarande 25 kg TNT. Detta tyder på att vattendimmsystem har hög skadetålighet gentemot direkt sprängverkan.

Motsvarande tester har även genomförts i Finland. Här provades om ett vattendimmsystem kan motstå splitterverkan från förfragmenterad ammunition som penetrerar en överbyggnad i aluminium (Hiltz m.fl., 2015). Även här hade vattendimmsystemet hög skadetålighet mot vapenverkan. Det visade sig även att de hål/skador som uppstod på rören motsvarade 2–3 extra munstycken och hålet/skadan hade en K-faktor på ungefär 5,5 (l/min)/bar^{1/2}. Den höga skadetåligheten bedöms bero på den höga styrkan i det rostfria stålet samt rörväggarnas tjocklek i högtrycksrören (Hiltz m.fl., 2015).

Storskaliga brandförsök genomfördes i Sverige 2013 i ett utrymme med volymen 135 m³ (7,5 m x 7,5 m x 2,4 m) med en öppning på 1,6 m² (0,8 m x 2,0 m) (Rahm m.fl., 2014). Ett utrymme med en relativt stor volym och en öppning valdes för att simulera stridsskador på ett ytfartyg vilket innebär att brandens beteende vid sänkt syrehalt och påverkan av brandgaser inte påverkade försöket. Detta betyder att förutsättningarna inte motsvarar de ombord på en ubåt, men försöken är ändå relevanta ur en skadetålighetssynpunkt.



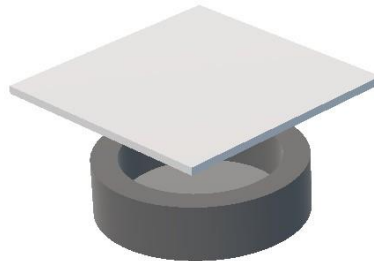
Figur 5.8 Försöksuppställning (1. Munstycken, 2. Balja)

För att simulera skador användes två scenarier

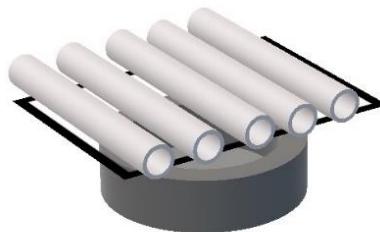
- Reducerat tryck i ett intakt system
- Skadade rörsektioner och munstycken i systemet

Försöken uppfyllde kraven enligt MSC/Circ.1165, vilket innebär att det horisontella avståndet mellan munstyckena (1) var som högst 5 m och de var inte placerade längre ifrån skottet än 2,5 m. Ett torrörssystem med fyra munstycken av typ UltraFog 202–2,09-O med en K-faktor på 2,09 (l/min)/bar^{1/2} och ett systemtryck på 100 bar monterades (Hiltz m.fl., 2015).

5.4.1.1 Försök med reducerat tryck



Figur 5.9 Försöksuppställning i helt dold brand.



Figur 5.10 Försöksuppställning i delvis dold brand.

Vid försöken varierades trycket mellan 5 % och 100 % av det normala systemtrycket och släckeffekten bedömdes på pölbränder utan obstruktioner, 25 % hinder, 50 % hinder och 100 % hinder. För att simulera 25 %, 50 % och 75 % obstruktion placerades en mängd rör med 100 mm i diameter 250 mm ovanför branden enligt skissen i Figur 5.10. För att simulera en 100 % dold brand placerades en obrännbar cementfiberskiva placerad 250 mm ovanför branden enligt skissen i Figur 5.9. Som bränsle användes diesel och branden var placerad i en balja med en area på 1,08 m² vilket teoretiskt borde ge en effektutveckling på ungefär 1,3 MW (Rahm m.fl., 2014).

Att använda tiden till släckning som kriterier är enligt rapporten väldigt osäkert, särskilt i den välventilerade miljön i testerna. Små ändringar i förhållanden kan medföra stora skillnader i släcktider. I försöken som genomfördes i studien släcktes inte bränderna när gastemperaturen sjönk för snabbt, vilket är motsägelsefullt (Rahm m.fl., 2014).

Enligt studien är en förklaring till detta att det maximala partiala ångtrycket begränsas när temperaturen minskar, vilket leder till att syrenivån inte sänks lika mycket eftersom den är beroende av både förbränningsprodukterna och halten vattenånga i utrymmet. Denna motsägelse uppstod i fallen då branden inte var dold och vattentrycket var 75 % och 100 % av systemtrycket.

I dessa fall sloknade branden först när bränslet brunnit upp samtidigt som medeltemperaturen sjönk till under 80 °C på under 2 minuter respektive 2,5 minuter.

Tiderna för att släcka branden och tiderna tills medeltemperaturen sänks till 80 °C ökade då branden doldes under obstruktionerna. Detta beror möjligen på att mängden vattendroppar som når branden och sedan förångas är mindre.

Alternativt eller i kombination med faktumet att obstruktionerna ger en återstrålning till branden vilket leder till en högre effektutveckling och därför en högre temperatur i utrymmet. Den högre temperaturen vid de dolda bränderna kan vara en bidragande orsak till att branden släcktes, men inte när den var helt exponerad för vattendropparna med 75 % och 100 % av normalt arbetstryck (Rahm m.fl., 2014).

Tabell 5.3 Resultat.

| Tryck (% av systemtryck) | Tid efter aktivering till temperaturen sänkts till under 80 °C (minuter: sekunder) | | |
|-----------------------------|---|-----------------|------------------|
| | 0 % dold brand | 50 % dold brand | 100 % dold brand |
| 100 | 01:57 | 02:57 | 03:57 |
| 75 | 02:22 | 02:37 | 04:16 |
| 50 | 02:27 | 02:43 | 02:58 |
| 25 | 03:46 | 03:41 | 05:53 |

Sammanfattningsvis visar försöken med reducerat vattentryck att temperaturen sänks till nivåer där liv kan räddas även med ett vattentryck så lågt som 25 % av vad systemet designats för att använda. Med ett tryck så lågt som 5 bar, vilket motsvarar trycket i ett normalt brandpostsystem, begränsas temperaturen så pass att sannolikheten för övertändning väsentligt minskas.

5.4.1.2 Försök med stridsskadat system

För att få fram rör med verkliga skador genomfördes sprängningar i en sprängkammare med rör monterade 2 m och 3 m från sprängladdningen; vissa rör blev helt avskurna och andra punkterade (Rahm m.fl., 2014). Försök genomfördes därefter med ett antal av de skadade rören med en helt exponerad brand.

Förmågan hos ett vattendimsystem att blanda vattendroppar, vattenånga och förbränningsprodukter inom ett utrymme är en bra indikator på hur effektivt systemet är. För att mäta detta användes *Temperature Uniformity Factor (TUF)* enligt ekvationerna nedan. Desto lägre värde desto jämnare temperatur vilket innebär en bättre omblandning (Rahm m.fl., 2014).

$$TUF(t) = \sqrt{\text{Var}(T^1, \dots, T^n)}$$

$$\text{Var}(T^1, \dots, T^n) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (T_j(t) - \bar{T}(t))^2$$

$$\bar{T}(t) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n T_j$$

$TUF(t)$ = Temperature uniform factor, vid tiden (t) i °C
 $T_j(t)$ = Temperaturen uppmätt vid termoelement j , vid tiden (t) i °C
 $\bar{T}(t)$ = Medeltemperaturen, vid tiden (t) i °C

I vissa av försöken med skadade rör kunde systemet ganska effektivt blanda runt gaserna i utrymmet. Den effektiva blandningen av gaser kunde enligt rapporten bero på asymmetrin i utsläppet av vatten orsakat av skadorna på rören vilket skapar turbulens i utrymmet. Alternativt kan det helt enkelt bero på den ökade påföringen av vatten i vissa delar av utrymmet. Vatten kan i vissa tester ha träffat termoelementen vilket påverkar TUF värdet (Rahm m.fl., 2014), jämfört med försöken då systemet hade reducerat tryck fungerade det skadade systemet minst lika bra.

I försöken med ett reducerat antal munstycken nådde temperaturen som högst mellan 150 °C och 170 °C för att efter cirka 10 minuter minska till 80 °C (Rahm m.fl., 2014). Temperaturerna hölls inom en nivå där sannolikheten för övertändning var väldigt låg.

5.4.2 Släcksystem i ammunitionsdurkar

Inom projektet studerades även vattendimma som ett alternativ till de krav och rekommendationer som standarder och regelverk ställer. Dessa är generellt utformade med konventionella sprinklers (durkstrilningssystem) i åtanke, vilket innebär att kraven och rekommendationerna innebär större påföringsmängder än de som är tillämpbara för vattendimsystem.

NATO standarden ANEP-77 (Naval Ship Code) ställer krav på ett sprinklersystem med ett vattenflöde motsvarande 24 l/m² per minut för inbyggda ammunitionsförråd (ammunitionsdurkar) som är en del av fartyget (*Naval Ship Code: Edition E Version 1*, 2014).

Klassningssällskapet Det Norske Veritas (DNV), nu Det Norske Veritas - Germanischer Lloyd (DNV GL) ställer i sin ”*rules for classification of naval and naval support vessels*” krav på ett vattenflöde motsvarande 32 l/m² per min i utrymmen där ammunition förvaras (*RULES FOR CLASSIFICATION OF SHIPS/HIGH SPEED, LIGHT CRAFT AND NAVAL SURFACE CRAFT*, 2005).

ANEP-77 ställer även krav på att ammunitionsdurkar inte skall placeras i närheten och absolut inte under utrymmen med personal, ett krav som är svårt att uppfylla på en mindre ubåt.

För att kunna prova vattendimmas förmåga att kyla, i detta fall torpeder eller robotar, genomfördes försök på en simulerad torped bestående av en 2 meter lång stålcylander med diametern 0,35 meter och godstjockleken 3 mm. Stålröret fylldes med sand och termoelement monterades för att mäta ytemperaturen. ”Torpeden” placerades i två nivåer över en brand motsvarande den i försöken med stridsskadat system. På det första nivån var torpeden placerad 50 mm rakt ovanför branden och på de andra nivån placerades den 50 mm över branden men förskjutet i sidled.

Kraven som ställdes var:

- Yttemperaturen på torpeden får ej överstiga 200 °C under hela försöket
- Yttemperaturen på torpeden får ej överstiga 150 °C senare än 60 sekunder efter att släcksystemet aktiverats.

Systemen som provades var olika typer, ett lågtryckssprinklersystem och ett vattendimsystem. Installationen av lågtryckssystemet bestod av fyra munstycken med 1 meter mellanrum monterade i linje med torpeden. Lågtryckssystemets vattenflöde varierades mellan motsvarande 32, 10, och 5 l/m² per minut och vattendimman hade ett vattenflöde motsvarande 5 l/m² per minut.

Försöken visade att en vattendensitet lägre än de 24 l/m² per minut enligt ANEP-77 och 32 l/m² per minut enligt DNV GL kunde klara testkraven. Vid försöken räckte det med 10 l/m² per minut för att klara kraven.

I försöken där vattendimma med ett vattenflöde motsvarande 6 l/m² per minut användes uppfylldes inte kraven (Tabell 5.4).

Tabell 5.4 Resultat

| Placering av "torped" | Maximal yttemperatur (°C) | Maximal yttemperatur > 1 min efter aktivering (°C) | Tid till branden släkt (min:ss) |
|-----------------------|---------------------------|--|---------------------------------|
| Över branden | 456 | 456 | Brand ej släkt |
| Vid sidan om branden | 268 | 268 | 5:20 |

En slutsats som kan dras är att vattendimsystem inte är ett lämpliga för att kyla ytor när det installeras som punktsläcksystem under liknande förutsättningar som under försöken.

5.4.3 Vattendimma ombord på ubåtar

Inom ramen för FiST genomfördes en litteraturstudie vid Statens Provningsanstalt (nu RISE) där olika alternativa släcksystem på ubåtar studerades (enligt (Arvidson, 2013), refererad i (Hiltz m.fl., 2015)).

5.4.3.1 Konventionell vattendimma

Fördelarna med ett konventionellt vattendimsystem är enligt rapporten dess större förmåga att kyla (brandgaser) tillsammans med de andra fördelarna med vatten som släckmedel (miljö och personsäkerhet). Riktlinjer gällande installationer finns dessutom tillgängliga i internationellt erkända standarder.

Nackdelarna är enligt rapporten att släcktiden vid vissa scenarier är väldigt lång; ibland släcks branden inte alls oberoende av hur lång tid som systemet får på sig att verka. Till dessa scenarier hör bränder som är förhållandevis små i förhållande till brandutrymmets volym. Andra nackdelar för konventionella vattendimma är att nuvarande IMO-standarder är dåligt anpassade för förhållandena ombord på ubåtar.

5.4.3.2 Tvåfluid-system

Fördelarna med ett system som kombinerar vattendimma och inertgas är enligt rapporten den låga vattenförbrukningen relativt ett konventionellt vattendimsystem. Inblandningen av inertgas ökar även sannolikheten för att små bränder släcks och förkortar släcktiderna vilka båda är nackdelar med ett konventionellt vattendimsystem.

Nackdelen med systemet ombord på ubåtar är enligt rapporten tryckökningen som skapas då gas används. Att ventilerat övertrycket till ett närliggande utrymme ombord på en ubåt är direkt olämpligt och en stor nackdel om det krävs.

5.4.3.3 NanoMist®

NanoMist® är enligt rapporten ett lovande system för brandsläckning och skydd mot explosioner i maskin och elapparatur ombord på ubåtar. Vattendimman i systemet genereras av ett tunt skikt med vatten sprids över en metallplatta som vibrerar med hög frekvens. Vibrationerna bryter upp vattnet vilket resulterar i mycket små vattendroppar som kan bli mindre än 10 µm i diameter. Vattendropparna är så små att det behövs ett gasflöde (kvävgas) över den vibrerande plattan för att sprida vattendropparna i det skyddade utrymmet. Nackdelen är att det kan krävas långa tider för vattendimman att fylla utrymmet vilket kan resultera i långa släcktider. Då det enbart finns en tillverkare av systemet är tillgängligheten osäker.

5.5 Systemförsök genomförda av SFPE

5.5.1 Systemförsök

I handboken som SFPE (Society of Fire Protection Engineers) ger ut handlar kapitel 46 om vattendimma. Där finns data från tre olika företag och deras vattendimmsystem sammanställt tillsammans med ett konventionellt sprinklersystem som referens. De olika vattendimmsystemen i sammanställningen var konstruerade med olika arbetstryck.

Försöket är framtaget för att få en övergripande förståelse vad som skiljer de olika systemen från varandra med hänsyn till olika parametrar.

De parametrar som lyftes fram var; tryck, tryck i munstycket, K-faktor, avstånd mellan munstyckena, antal munstycken i området, totala flödet för systemet, pumptryck, typ av system samt vilken kraft pumpen använder.

Syftet med sammanställningen var inte att utvärdera vilket som är det bästa systemet, utan snarare att se vilket system som är den bästa lösningen för ett specifikt problem. Försöken ger i stället en uppfattning om vad de olika systemen har för egenskaper. Kostnaden för installation och underhåll saknas i jämförelsen, men ändå bör inkluderas när lösningar tas fram då det kan ha en stor inverkan på vilket system som i slutändan installeras.

5.5.2 Resultat

Tabell 5.5 Sammanställning av system och parametrar.

| Typ | Typ av munstycke | Tryck i munstycket (bar) | K-faktor | Inbördes avstånd (m) | Antal munstycken | Totalt vattenflöde (L/min) | Pumptryck (Bar) | Tryckklass | Pumpeffekt (kW) |
|-------------------------|------------------|--------------------------|----------|----------------------|------------------|----------------------------|-----------------|------------|-----------------|
| Tillverkare A | LP- LWM | 6 | 10,0 | 2,7 | 12 | 338 | 16 | IP | 9 |
| Tillverkare A | LP- LWM | 6 | 20,0 | 2,7 | 12 | 676 | 16 | IP | 18 |
| Tillverkare A | IPWM | 10 | 14,3 | 2,4 | 16 | 832 | 20 | IP | 28 |
| Tillverkare B | IPWM | 13 | 9,2 | 2,4 | 16 | 610 | 20 | IP | 20 |
| Tillverkare C | HPWM | 70 | 5,2 | 2,4 | 16 | 801 | 90 | HP | 120 |
| Konventionell sprinkler | LPSS | 3 | 80,7 | 2,4 | 16 | 2572 | 8 | LP | 34 |

Tabell 5.6 Förklaring av förkortningar för system.

| Typ | Vattendimma | Linjärt vattendimmsystem | Konventionell sprinkler |
|-------------|-------------|--------------------------|-------------------------|
| Förkortning | WM | LWM | SS |

Tabell 5.7 Förklaring av förkortningar för tryck.

| Tryckklass | Lågtryck | Mellantryck | Högtryck |
|-------------|----------|-------------|----------|
| Förkortning | LP | IP | HP |

Från sammanställningen i Tabell 5.5 syns det att de olika kategorierna som undersöks skiljer sig relativt mycket. Det är inte bara skillnader mellan de olika systemtyperna, utan även inom samma systemkategori. Resultaten ger en bra fingervisning i hur de olika systemen beter sig relativt varandra.

Om ett system ska installeras men det finns begränsningar gällande strömtillförsel skulle ett mellantryckssystem av tillverkare A vara relevant, då den pumpen kräver minst effekt. Dock om avsikten är att vattenbegjuta utrymmet är ett högtryckssystem av tillverkare C mer aktuellt, då den har ett systemflöde på 801 l/minut. Samtidigt skulle detta system inte var relevant om tillgången till vatten är begränsad.

5.6 Studier om litiumjonbatterier och vattendimma på ubåtar och fartyg

5.6.1 RISE – Lion Fire II

2021 genomfördes projektet ”*Lion Fire II - Extinguishment and Mitigation of Fires in Lithium-ion Batteries at Sea*” vid RISE. Inom projektet genomfördes studiebesök på ett antal svenska passagerarfartyg med litiumjonbatterier installerade.

Ett antal försök med olika typer av släcksystem och olika förutsättningar genomfördes utomhus i containers med målet att ta fram uppställningar för framtida försök. Tidigare studier och befintligt regelverk studerades också.

5.6.1.1 Försök

I försöken användes olika typer av släcksystem. Två av dessa var ett vattendimmsystem konfigurerat för rum- och punktskydd. Försöken med rumsskyddskonfigurationen genomfördes med vanligt vatten och vatten med tillsatsen F500. Försöken med punktskyddskonfiguration genomfördes med vanligt vatten och vatten med tillsatsen Aqueous Vermiculite Dispersion (AVD). AVD är framtagen för bränder i litiumjonbatterier (*What is Aqueous Vermiculite Dispersion?*, u.å.).

Installationen av vattendimmsystem var inte optimerat för uppställningen i försöken utan en standardlösning valdes. I punktskyddsfallet användes en mobil boendesprinkler. Dessutom var dörrarna öppna till containern, vilket innebar att vattendimmsystemet inte kunde nå en optimal koncentration. Testerna genomfördes med rackmonterade battericeller av typerna; litiumjärnfosfat (LFC) och litiumnickelmangan-koboltoxid (NMC).

Vattendimma visade sig kunna sänka temperaturen i containern och i racket, men inte till den grad att kritiska temperaturer vid närliggande celler förhindrades. Försöken med och utan tillsatser visade heller ingen större skillnad i resultat. Rapporten konstaterar dock att resultaten sannolikt påverkats negativt av den ofördelaktiga försöksuppställningen, vilket innebär att några större slutsatser inte kan dras kring vattendimmas förmåga att släcka bränder och förhindra spridning av termisk rusning i litiumjonbatterier (Bisschop m.fl., 2021).

5.6.1.2 Krav, regelverk och standarder för batteriutrymmen

DNV GL ställer krav på att batteriutrymmen på fartyg skall skyddas med ett vattendimmsystem enligt standarden MSC/Circ.1165 tillsammans med ändringarna enligt MSC.1/Circ.1269 och MSC.1/Circ.1386. Systemet skall ha tillgång till vatten tillräckligt för en släckinsats i 30 minuter.

Transportstyrelsen har motsvarande rekommendationer som DNV GL i ”*Transportstyrelsens riktlinjer för batteri- och hybriddrivna fartyg*” (*Transportstyrelsens riktlinjer för elektrifiering av fartyg*, 2023).

5.6.2 Vattendimma för litiumjonbatterier på ubåtar

Defence Science and Technology Group i Australien presenterade hösten 2019 resultaten av inledande studier om vattendimma i batterirum med litiumjonbatterier. Målet med studierna var att ta fram släckkriterier för bränder i litiumjonbatterier och att utveckla Computational Fluid Dynamic (CFD) modeller för att kunna förutse vattendimmas släckförmåga i litiumjonbatteribränder. Studierna genomfördes i samarbete med Victoria University's Centre for Environmental Safety and Risk Engineering (CESARE).

Enligt studien visar tidigare försök att vattenbaserade släckmedel effektivt kan kyla och släcka flammorna, vilket förhindrar spridning av den termiska rusningen till andra battericeller. Detta har dock åstadkommit genom att använda stora mängder vatten eller att helt enkelt ha sänkt ner hela batteriet i vatten. Denna typ av lösning som kräver hög vattenförbrukning anses vara olämplig ombord på ubåtar.

De inledande resultaten visar enligt rapporten att vattendimma kan vara en metod för att släcka bränder i litiumjonbatterier ombord på ubåtar (Burch m.fl., 2019).

5.6.3 Brandriskanalys för konventionella ubåtar

I en riskanalys för brandrisker ombord på ubåtar kopplat till olika former av framdrivningssystem (litiumjonbatterier, stirlingmaskineri, bränsleceller och MESMA-ångturbin) analyserades de olika systemens för- och nackdelar.

Rapporten (Fire Safety Risk Analysis of Conventional Submarines) genomfördes i Australien och kom fram till att litiumjonbatterier hade den största risken av de utredda systemen (Depetro m.fl., 2021).

För att minimera riskerna med litiumjonbatterier rekommenderar rapporten ett antal åtgärder:

- Installation av ett batteriövervakningssystem för att förhindra termisk rusning.
- Ökat avstånd mellan celler för att förhindra spridning av termisk rusning.
- Batteri- och cellkylning för att förhindra spridning av termisk rusning.
- Sänkt syrehalt i batteriutrymmet
- Skyddsåtgärder med aktiva brandskyddssystem där vattendimma nämns som ett alternativ.
- Skyddsåtgärder med passiva brandskyddssystem som brandskyddsfärger och brandceller.

5.7 Vattendimma på rymdfarkoster

5.7.1 Inledning

Rymdfarkoster har likheter med ubåtar (SAAB, 2020), exempelvis i komplexitet samt att båda är slutna volymer. Exempelvis rymdfärjorna använde Halon 1301, vilket innebär att problemställningen för ubåtar och rymdfärjor påminner om varandra: vad kan ersätta Halon 1301 i en sluten volym fylld med människor och avancerad teknisk utrustning? (Delplanque m.fl., 2004).

Med anledning av ett förnyat intresse för bemannade rymdfärder har nyutveckling av rymdfarkoster krävts som exempelvis Crew Exploration Vehicle (CEV) som resulterade i Orion Multi-Purpose Crew Vehicle (MPCV) (Lockheed Martin, u.å.). Utvecklingen av dessa nya rymdfarkoster har krävt en ny värdering av brandsläcksystemen ombord.



Figur 5.11 Orion Multi -Purpose Crew Vehicle (MPCV)
(bild hämtad ifrån Wikimedia Commons, bild: NASA Johnson Space Center)

5.7.2 Försök med vattendimma

En studie som om vattendimma på rymdfarkoster är *Study of an ultra-fine water mist suppression system for spacecraft fires* som genomfördes på *Center for Commercial Applications of Combustion in Space* vid *Colorado School of Mines* (Abbud-Madrid m.fl., 2006). Den experimentella studien genomfördes för att utreda olika typer av släckmedels möjlighet att begränsa och släcka bränder i spänningsförande kablar, elkompnenter på kretskort och i tyg. Försöken genomfördes i förhållanden med normal gravitation.

Vattendimman som användes vid försöken var av en typ med mycket små droppar med en medeldiameter på 8 μm . Systemet var av hybridtyp och drevs med trycksatt luft och kvävgas (N_2), för referens testades gasläcksystem med koldioxid (CO_2) och kvävgas (N_2).

Försöken genomfördes i en låda med bredden 44 cm, höjden 25 cm och ett djup på 51 cm, vilket överensstämmer med geometrin hos ett lastutrymme i rymdfärjans mellandäck. Försök med tre olika brandscenarier genomfördes.

- Brandscenario 1: Överhettad kabel, en 15 cm lång kabel med en isolering av polyeten monterades i lådan. Isoleringen fick en yttre temperatur på över 100 °C och branden en effektutveckling på 27 W.
- Brandscenario 2: Brinnande komponent på kretskort, en 15 cm lång PMMA-stav med en diameter på 2 cm värmdes upp med en effekt på 25 W. Den efterföljande branden hade en flamspridningshastighet på 0,4 mm/s och en medelbrandeffekt på 250 W.
- Brandscenario 3: Brinnande tyg, en 2,5 cm bred och 10 cm lång trasa i ren bomull brändes. Branden hade en flamspridningshastighet på 0,5 mm/s och en medelbrandeffekt på 200 W.

5.7.3 Resultat

5.7.3.1 Brandscenario 1: Kabelbrand

I scenariot med brinnande kabel (scenario 1) uppnådde de båda släcksystemen med gas (CO_2 och N_2) jämförbara släcktider (14,1 sekunder för CO_2 och 13,3 sekunder för N_2), vilket är förväntat då de har en värmekapacitet per massenhet som är liknande. Massflödet för gaserna var 1,0 g/s. Vattendimma med komprimerad luft som drivgas hade betydligt längre släcktider (25,3 sekunder). Detta kan enligt rapporten förklaras med två faktorer, den höga temperaturen på kabeln orsakad av den stora elektriska effekten (450 W) i kabeln, vilket är flera gånger större än effekten på branden (27 W). Den andra faktorn är vattendimmas svårigheter att släcka små bränder, kallad "small-fire syndrome". Det innebär att små bränder kan fortgå trots låga syrenivåer, vilket begränsar möjligheten för vattendimma att förångas.

För att prova hypotesen genomfördes ytterligare tester med vattendimma, denna gång med ett mindre massflöde (0,2 g/s i stället för 1,0 g/s i de första försöken). Resultatet blev att det tog väsentligt längre tid för branden att slockna (82,3 sekunder) men mängden vatten som krävdes var 65 % mindre. Detta visar enligt rapporten att vattendimma väldigt effektivt kan dämpa en brand.

Försöken där kvävgas användes som drivgas bidrog till släcktider motsvarande de för enbart gas (14,3 sekunder). Massflödet i försöken var totalt 1,0 g/s (0,5 g/s vattendimma och 0,5 g/s N₂).

Rapporten poängterar att enbart gassläckmedel inte kunde släcka branden med massflöden lägre än 1,0 g/s. För dessa förhållanden är kombinationen vattendimma och syresänkningen orsakad av kvävgasen enligt rapporten överlägset. En annan fördel med vattendimman är att den kyler kabeln, något som inte gaserna gör. I försöken med gaserna går kabeln sönder på grund av värmen, men inte i försöken med vattendimma där kabeln håller.

5.7.3.2 Brandscenario 2: Brand i kretskort

I detta scenario användes en lägre elektrisk effekt för att värma PMMA-staven än vad som användes för att värma elkabeln i scenario 1 (25 W i scenario 2 och 450 W i scenario 1). Detta medförde att vattendropparna förångades av branden i stället för av värmeelementet och den upphettade kabeln som i scenario 1. Resultatet blev att vattendimma fick kortast släcktid (13,7 sekunder) tätt följt av gaserna (13,8 sekunder för CO₂ och 17,4 sekunder för N₂).

Försök genomfördes även med en mindre mängd vattendimma (0,2 g/s i stället för 1,0 g/s) på samma sätt som i scenario 1. Resultaten blev motsvarande de för försöken i scenario 1. Släcktiden blev längre (60,5 sekunder) men med ungefär samma total mängd använt vatten.

5.7.3.3 Brandscenario 3: Brand i tyg

Vattendimman släcker branden snabbare (8,1 sekunder) än gaserna (12,3 sekunder för CO₂ och 10,6 sekunder för N₂) i detta försök. Ytterligare en fördel för vattendimman i denna uppställning är att den blöter ner tyget och hindrar brandens spridning, då den skapar en barriär där vattnet absorberas av tyget.

6 Diskussion

I detta kapitel sammanfattas resultatet från studien gällande krav, regelverk och standarder. Vidare diskuteras sammanställningen av tidigare genomförda studier och försök om vattendimma i fartyg och ubåtar. Även vattendimmas lämplighet som släcksystem ombord på ubåtar diskuteras.

6.1 Krav, regelverk och standarder

Sammanställningen av vilka krav och regelverk som gäller för ubåtar visar att olika regelverk och krav påverkar varandra och helheten kan uppfattas som komplex. För ett civilt handelsfartyg är denna struktur fortfarande komplex men mer logisk.

I fallet för örlogsfartyg påverkas dessa av både civila- nationella och internationella krav och regelverk, tillsammans med militära nationella och internationella krav som i sin tur är tolkningar av de civila kraven. Utöver det finns klassningssällskapens krav, vilka svenska ubåtar inte omfattas av.

Då ubåtsverksamhet omfattas av sekretess är vissa regelverk inte tillgängliga. Ett exempel på detta är ANEP-102 som är motsvarigheten av ANEP-77 (NSC) fast för ubåtar. ANEP-102 har informationssäkerhetsklassen NATO RESTRICTED.

Brandskyddet på ubåtar påverkas av två dokument, där den ena är UKR som inte innehåller några krav på specifika standarder utan i stället är en sammanställning av lösningar och principer grundade på erfarenheter. UKR består av olika krav och rekommendationer. Det andra dokumentet är RMS-F, vilket är baserat på de civila krav som Transportstyrelsen ställer på den civila sjöfarten i TSFS 2009:98. RMS-F skall samtidigt stämma överens med RMS-NSC vilket är en svensk tolkning av ANEP-77, dock så gäller RMS-NSC enbart för ytfartyg. Både ANEP-77 och TSFS 2009:98 bygger i sin tur på FSS-koden och SOLAS 74. FSS-koden är ett komplement gällande brandsäkerhet till SOLAS 74 som ges ut av IMO. Se Figur 3.1.

De regelverk som inte är krav för ubåtar kan ändå innehålla viktig information, ett exempel är RMS-NSC. Där tillåts inte vattenånga som släcksystem, något som inte nämns i något annat regelverk. Ett annat exempel är DNV GL, där nämns att fasta brandsläcksystem enbart får aktiveras manuellt efter att all personal utrymt utrymmet (*RULES FOR CLASSIFICATION Naval vessels*, 2015). Detta innebär att automatiskt aktiverade system inte får användas.

Förenklat innebär detta att de krav som ställs på brandsäkerheten ombord på ubåtar i RMS-F skall motsvara kraven i TSFS 2009:98, med vissa undantag för ubåtar enligt Tabell 3.1. Ett undantag är att vattendimmsystem skall vara uppdelade i sektioner för att begränsa skador på utrustning och för att reducera vattenförbrukningen.

Dessa krav hänvisar ofta till specifika standarder för vattendimma kopplat till specifika utrymmen och provningsmetoder, se Figur 3.2. För vattendimma som rumsskydd i maskinrum gäller MSC/Circ.1165 med dess tillägg. Dessa system skall även vara provade enligt MSC.1/Circ.1385. Samma krav gäller även batteriutrymmen. För vattendimma som punktskydd i maskinutrymmen större än 500 m³ gäller MSC.1/Circ.1387. Ett vattendimmsystem installerat för att skydda fritöser och ventilationstrummor i kök skall uppfylla MSC.1/Circ.1433 som i sin tur hänvisar till ISO 15371:2015. I bostadsutrymmen ska installation av sprinklersystem uppfylla Resolution A.800 (19) med tillägg. Ammunitionsdurkar saknar dock särskilda krav för vattendimma, då kraven är utformade för konventionella sprinklersystem.

Standarderna och kraven är utformade efter behoven och förutsättningarna ombord på civila handelsfartyg. Detta innebär att standarderna inte alltid är helt lämpliga ombord på ubåtar och för deras unika förutsättningar (Arvidson, 2013). Om mer anpassade lösningar krävs och ett annat alternativ måste tillfinnas möjligheten att frångå kraven, då RMS-F tillåter att brandskyddet utformas enligt TSFS 2009:98 Bilaga 1 Regel 17 ”Alternativ utformning av brandskydd”.

Sammantaget innebär detta att det finns regelverk som ställer krav på standarder för användandet av vattendimma i majoriteten av ubåtens utrymmen, dock ej ammunitionsdurkar. Då standarderna har sitt ursprung i den civila sjöfarten finns flertalet tillverkare med system skapade för dessa krav.

6.2 Tidigare studier och försök

Sammanställningen av tidigare studier och försök har varierande koppling till ubåtar, vissa berör ubåtar direkt, andra indirekt och andra inte alls men är genomförda med förutsättningar liknande dem ombord på ubåtar.

Referenser till rapporter som bedöms ha hög relevans hittades, men som inte varit tillgängliga i sin helhet på grund av sekretess. Ett exempel på detta är *Optional fire protection systems for machinery spaces on submarines* (Arvidson, 2013). I just detta fall är dock rapportens huvudsakliga innehåll publicerad i en offentlig rapport som refereras till.

US Navy studerade tidigt möjligheten att använda vattendimma ombord på örlogsfartyg. Inledande numeriska studier påbörjades i slutet av 1970-talet för att ta reda på hur effektivt vattendimma kan släcka bränder genom kylning av brandgaser (Darwin m.fl., 1999). Dessa studier validerades senare genom brandförsök för att utveckla ett koncept för att använda vattendimma som släcksystem ombord på ubåtar. Resultaten visade på goda egenskaper vad gäller kylning och brandsläckning i ubåtsmiljö.

År 1990 inleddes en serie små- och storskaleförsök i maskinutrymmen. Slutsatserna från försöken var att vattendimma har svårt att släcka små bränder samt dolda bränder (Darwin m.fl., 1999). Samtidigt visade försöken att vattendimma hade mycket god förmåga att kyla brandgaser, begränsa bränder och skydda mot övertändning.

Försök genomförda i en kopia av en hytt ombord på korvett av Visbyklass 2003 visar liknande resultat när det gällde vattendimmas förmåga att snabbt kyla brandgaser (Arvidson, 2003). I dessa försök släcktes bränderna i flamskyddade madrasser. Just flamskyddet kan ha påverkat resultatet positivt men liknande madrasser används troligen i hytter på ubåtar vilket gör försöksresultaten relevanta.

Samma goda brandgaskylande egenskaper visade försök genomförda inom ramen för samarbetsprojektet *FiST*, även i förhållanden då systemet utsattes för omfattande stridslänkande skador (Hiltz m.fl., 2015). Systemets konstruktion visade sig även vara mycket robust. Samma svårigheter att släcka dolda bränder som försöken av US Navy kom fram till visade sig även i dessa försök.

Vattendimma har en begränsad förmåga att kyla redan upphettade ytor på grund av de små mängderna vatten och därav låga förångningsenergi jämfört med stora droppar som är mer effektiva för kylning av ytor. Detta visar försöksresultaten i *FiST* och amerikanska studier för vattendimma på rymdfarkoster (Abbud-Madrid m.fl., 2006). Detta innebär att vattendimma inte är ett lämpligt alternativ för att kyla vapen, exempelvis torpeder och robotar. En lösning med större vattendroppar bör vara lämplig istället.

Om litiumjonbatterier är ett framtida batterialternativ ombord på ubåtar innebär detta ökade risker, exempelvis på grund av sannolikheten för termisk rusning. Några bra försök med vattendimma som släcksystem för batteriutrymmen med litiumjonbatterier har inte hittats. En studie som berör litiumjonbatterier är inom projektet *Lion Fire II* (Bisschop m.fl., 2021). Tyvärr var målet med försöken inte att prova system och lösningar utan att utveckla brandprovningmetoder, och detta resulterade i ofördelaktiga försöksförutsättningar vilket gör att några långtgående slutsatser kring vattendimmas prestanda inte kan dras.

Det som kan hittas är två australiska studier, den ena om vattendimma i batteriutrymmen (Burch m.fl., 2019) där inledande resultat visar att vattendimma kan vara ett alternativ för att skydda litiumjonbatterier. Den andra är en riskanalys för konventionella ubåtar där vattendimma listas som ett möjligt alternativ (Depetro m.fl., 2021).

Som en del i *FiST*-projektet genomfördes en litteraturstudie om olika typer av vattendimma och deras lämplighet som släcksystem ombord på ubåtar (Arvidson, 2013). Fördelar och nackdelar med konventionell vattendimma, tvåfluidsystem och NanoMist® redovisas. För konventionella vattendimsystem är en av fördelarna goda förmågan att kyla brandgaser och en nackdel är svårigheten att släcka förhållandevis små bränder samt att vissa bränder inte släcks helt. Detta överensstämmer väl med resultaten i de andra rapporterna.

I fallet med tvåfluidsystem är en fördel relativt konventionella vattendimsystem att de har lägre vattenförbrukning och bättre förmåga att släcka bränder, något som även visas i försöken med vattendimma på rymdfarkoster (Abbud-Madrid m.fl., 2006). Nackdelen är att tvåfluidsystemet orsakar en tryckökning, något som skulle kunna utesluta det som ett alternativ ombord på ubåtar.

Systemförsöken genomförda av Society of Fire Protection Engineers visar att vissa vattendimsystem har så pass låg vattenförbrukning att ubåten klarar av att kontinuerligt länsa ut den påförda vattenmängden, exempelvis så tillför tre munstycken av ”tillverkare A” 84,5 L/min (Scheffey, 2016) och ubåten skall som minst klara av att kontinuerligt länsa 83,3 L/min (*RMS-F*, 2013). Dock är det högst osannolikt att ett vattenflöde på 84,5 L/min är tillräckligt för att släcka eller begränsa en brand.

I en studie genomförd av Haukur Ingason och Magnus Arvidson på SP (nu RISE) 2005 krävdes fyra munstycken med 45 L/min per munstycke (180 L/min totalt) för att kontrollera branden och fyra munstycken med 67,5 L/min per munstycke (270 L/min totalt) för att begränsa branden. Systemen provades mot flera olika pöl- och spraybränder med diesel som bränsle och brandeffekter från 1 MW till 6 MW (Ingason & Arvidson, 2005).

Allt vatten som påförs kommer att påverka ubåtens stabilitet negativt, även den mängd som ubåten klarar av att länsa ut då den innebär en viktöverskjutning bort ifrån tanken där släckvattnet förvaras till området där vattnet påförs. Olika utrymmen i ubåten kommer att påverkas olika då deras olika avstånd från displacementstygndpunkten ger olika känslighet.

6.3 Vattendimma ombord på ubåtar

Sammanställningen av krav, regelverk och standarder samt sammanställningen av tidigare genomförda studier visar att vattendimma, under vissa förutsättningar, kan vara ett mycket bra alternativ för att ersätta Halon 1301 som släcksystem ombord på ubåtar. Vattendimmas goda förmåga att kyla brandgaser och begränsa bränder i kombination med låg vattenförbrukning visar detta.

Nackdelarna i form av att vissa bränder inte kan släckas helt utgör förstas problem, samtidigt som det inte bör utesluta vattendimma som lösning. Om ett vattendimsystem kombineras med andra former av fasta brandsläcksystem, exempelvis skumsystem under durklåtar i maskinrum och gassläcksystem i elskåp, tillsammans med en snabb insats av besättningen, bör konsekvenserna av vattendimmans brister kunna minimeras. Med dessa åtgärder kan fördelarna överväga nackdelarna.

Frågor gällande hur stor påverkan den av vattendimman påförda vattenmängden orsakar kvarstår. Att vattendimma har betydligt mindre vattenåtgång jämfört med konventionella sprinkler (Runefors, 2018). Den lägre vattenförbrukningen hos vattendimma ger lägre påverkan på stabilitet än konventionell sprinkler, men om den påförda vattenmängden orsakar stabilitetsproblem kan ej besvaras inom ramen för denna rapport.

Utifrån förutsättningarna ombord på ubåtar kan vattendimma mycket väl vara en tillräckligt bra kompromiss för att ersätta Halon 1301 som släcksystem i vissa utrymmen ombord på ubåtar, inte minst i kombination med andra system.

Överhettat vatten (vattenånga) bör inte vara ett system som används, då den inte är tillåten i RMS-NSC (*RMS-NSC*, 2013). Det finns troligen heller inga kommersiellt tillgängliga system. Även

för tvåfluidsystemet är det tveksamt om det är lämpligt med tanke på risken för övertryck och de personsäkerhetsrisker som inertgaser kan innebära för besättningen.

Då vattendimma fungerar som rumsskydd skall systemet vara sektionerat för att minska vattenförbrukningen (*RMS-F*, 2013). Trots att det inte är kravställt bör automatiskt aktiverade system undvikas, då DNV GL förbjuder det (*RULES FOR CLASSIFICATION Naval vessels*, 2015). Både i syfte att minska risken för eventuella besättningsmän kvar i det skydde utrymmet, och för att minimera risken för vådautlösning.

Att låta besättningen utrymma bör rimligtvis enbart gälla för utrymmen i den aktra tryckfasta avdelningen, som exempelvis maskinrummet som kan vara obemannat. Utrymmen och funktioner i den förliga tryckfasta avdelningen måste vara bemannade, exempelvis kontrollrummet, och kan således inte utrymmas innan en släckinsats. Att förliga tryckfasta avdelningen inte kan utrymmas om ubåten samtidigt skall kunna manövreras och genomföra sitt uppdrag innebär att den avdelningen och besättningen i den är känslig för en av brandgaser kontaminerad miljö.

7 Slutsats

Nedan presenteras slutsatserna till de olika frågeställningarna.

Kraven och regelverken för ubåtar motsvarar, med några få undantag, de för civila handelsfartyg. Detta innebär att det finns ett behov av regelverk särskilt anpassade för de specifika förutsättningarna på ubåtar. Brandskyddet kan även utformas enligt Transportstyrelsens metod för *alternativ utformning av brandskydd* (regel 17) om kraven och regelverken inte kan tillämpas eller anses ge en tillräckligt hög säkerhetsnivå. Detta kan jämföras med analytisk och förenklad dimensionering för byggnader. En fördel med att kraven och regelverken har sin grund i handelssjöfarten är att det finns flertalet system på marknaden designade för att uppfylla dessa standarder.

Det finns ett antal försök och studier genomförda inom ämnesområdet vattendimma och ubåtar, där lärdomar kan dras. Dessa är i huvudsak; vattendimmas goda förmåga att snabbt kyla brandgaser och svårigheterna att helt släcka små bränder. Vattendimmsystemet har även visat sig vara robust och skadetåligt, något som är en stor fördel ombord på örlogsfartyg. Det finns behov av ytterligare studier om vattendimmas förmåga och effekter på rumstryck vid användning i slutna utrymmen. Dessutom så bör stabilitetsberäkningar med förväntad mängd påfört vatten i respektive utrymme genomföras, för att få svar på om vattendimma tillför en mängd vatten som kan accepteras.

Utifrån studierna av krav och regelverk tillsammans med tidigare försök kan vattendimma, under vissa förutsättningar, vara ett alternativ till Halon 1301 ombord på ubåtar. Detta förutsätter att vattendimman kombineras med andra system och åtgärder för att minimera konsekvenserna av dess brister. Vattendimma kan då vara en tillräckligt bra kompromiss. Systemet skall vara sektionerat för att minska vattenförbrukningen och helst ha manuell aktivering. Kritiska system bör skyddas med punktskydd. Osäkerheter om släckverkan, tryckpåverkan, temperaturer och brandgaser vid utlösning av vattendimma i ett slutet utrymme kvarstår. För att kunna ta ett väl grundat beslut om vattendimma är en lämplig lösning för ubåtar bör verifierande försök i full skala, där exempelvis data om temperatur, tryck, brandgaser och sikt insamlas och senare analyseras, genomföras tillsammans med stabilitetsberäkningar.

Referenser

- Abbud-Madrid, A., Watson, J. D., Whittington, J. G., McKinnon, J. T., & Delplanque, J.-P. (2006). *STUDY OF AN ULTRA-FINE WATER MIST SUPPRESSION SYSTEM FOR SPACECRAFT FIRES*.
- Arvidson, M. (2003). *An evaluation of the performance of the high-pressure water mist system on board MS Visby*.
- Arvidson, M. (2013). *Optional fire protection systems for machinery spaces on submarines (dokumentet har ej varit tillgängligt)* (SP Report P900038).
- Arvidson, M. (2014). *Släcksystem med vattendimma—En förnyad kunskapssammanställning* (SP 2014:30; s. 75). SP.
- Arvidson, M. (2020). *Water mist fire protection systems The development of testing procedures for marine and heritage applications*.
- Bisschop, R., Andersson, P., & Hynynen, J. (2021). *Lion Fire II - Extinguishment and Mitigation of Fires in Lithium-ion Batteries at Sea*.
- Bohlin, S., & Olofsson, A. (2012). *Fire safety on board submarines – Crew interventions*.
- Burch, I., Ghiji, M., Gamble, G., Suendermann, B., Joseph, P., Moinuddin, K., & Novozhilov, V. (2019). *Lithium-ion Battery Fire Suppression in Submarine Battery Compartments*.
- Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2002). *Chemical process safety: Fundamentals with applications* (2. ed). Prentice Hall PTR.
- Darwin, R. L., Associates, H., & Willi, F. W. (1999). *OVERVIEW OF THE DEVELOPMENT OF WATER-MIST SYSTEMS FOR US NAVY SHIPS*.
- Delplanque, J.-P., Abbud-Madrid, A., McKinnon, J. T., Lewis, S. J., & Watson, J. D. (2004). *FEASIBILITY STUDY OF WATER MIST FOR SPACECRAFT FIRE SUPPRESSION*.
- Depetro, A., Gamble, G., & Moinuddin, K. (2021). Fire Safety Risk Analysis of Conventional Submarines. *Applied Sciences*, 11(6), 32. <https://doi.org/10.3390/app11062631>
- Forssell, E. W., & DiNenno, P. J. (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5th ed. 2016). Springer New York : Imprint: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>
- FSS Code*. (2007).

- Försvarsmakten. (2021). *Taktik för marina operationer – Del 2*. Försvarsmakten.
- Handbok Systemsäkerhet*. (2022). Försvarsmakten.
- Harrington, J., & Senecal, J. A. (2016). *SFPE handbook of fire protection engineering* (Fifth edition). Springer.
- Hiltz, J., Hertzberg, T., Wal, R. V. D., & Rahm, M. (2015). *New Technologies for Fire Suppression On Board Naval Craft (FiST) FINAL REPORT*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4552.2964>
- Hoover, J. B., Bailey, J. L., Willauer, H. D., & Williams, F. W. (2005). *Evaluation of Submarine Hydraulic System Explosion and Fire Hazards*.
- Ingason, H., & Arvidson, M. (2005). *Measurement of the efficiency of a water spray system against diesel oil pool and spray fires* (SP REPORT 2005:33).
- INSA. (2022). <https://www.navalshipcode.org/publiccodes>
- International Convention for the Safety of Life at Sea*. (1974).
- International Maritime Organization. (1995). *REVISED GUIDELINES FOR APPROVAL OF SPRINKLER SYSTEMS EQUIVALENT TO THAT REFERRED TO IN SOLAS REGULATION 11-2/12 (A 19/Res.800)*.
- International Maritime Organization. (1996). *RESOLUTION MSC.61(67) ADOPTION OF THE INTERNATIONAL CODE FOR APPLICATION OF FIRE TEST PROCEDURES*. INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION.
- International Maritime Organization. (1999). *GUIDELINES FOR THE APPROVAL OF FIXED WATER-BASED LOCAL APPLICATION FIRE-FIGHTING SYSTEMS FOR USE IN CATEGORY A MACHINERY SPACES* (MSC/Circ.913).
- International Maritime Organization. (2005). *REVISED GUIDELINES FOR THE APPROVAL OF EQUIVALENT WATER-BASED FIRE-EXTINGUISHING SYSTEMS FOR MACHINERY SPACES AND CARGO PUMP-ROOMS* (MSC/Circ.1165). INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION.
- International Maritime Organization. (2008). *AMENDMENTS TO THE REVISED GUIDELINES FOR APPROVAL OF SPRINKLER SYSTEMS EQUIVALENT TO THAT REFERRED TO IN SOLAS REGULATION II-2/12 (RESOLUTION A.800(19))* (MSC.265(84)).

- International Maritime Organization. (2010a). *REVISED GUIDELINES FOR THE APPROVAL OF FIXED WATER-BASED LOCAL APPLICATION FIRE-FIGHTING SYSTEMS FOR USE IN CATEGORY A MACHINERY SPACES (MSC/CIRC.913)* (MSC.1/Circ.1387).
- International Maritime Organization. (2010b). *SCIENTIFIC METHODS ON SCALING OF TEST VOLUME FOR FIRE TEST ON WATER-MIST FIRE-EXTINGUISHING SYSTEMS* (MSC.1/Circ.1385).
- International Maritime Organization. (2012). *REVISED GUIDELINES FOR THE MAINTENANCE AND INSPECTION OF FIRE PROTECTION SYSTEMS AND APPLIANCES* (MSC.1/Circ.1432). INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION.
- International Maritime Organization. (2015). *AMENDMENTS TO THE REVISED GUIDELINES FOR THE MAINTENANCE AND INSPECTION OF FIRE PROTECTION SYSTEMS AND APPLIANCES (MSC.1/CIRC.1432)* (MSC.1/1516).
- International Maritime Organization. (U.Å.). *AMENDMENTS TO THE REVISED GUIDELINES FOR APPROVAL OF SPRINKLER SYSTEMS EQUIVALENT TO THAT REFERRED TO IN SOLAS REGULATION II-2/12 (RESOLUTION A.800(19))* (MSC.284(86)).
- ISO. (2015). *ISO 15371:2015*. ISO. <https://www.iso.org/standard/68559.html>
- ISO - About us. (2023). ISO. <https://www.iso.org/about-us.html>
- Karlsson, E., & Vinberg, D. (2009). *Strukturellt brandskydd på marina farkoster*.
- Lockheed Martin. (u.å.). *Orion*. Lockheed Martin. Hämtad 30 oktober 2023, från <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/orion.html>
- Log, T., & Cannon-Brookes, P. (1995). 'Water mist' for fire protection of historic buildings and museums. *Museum Management and Curatorship*, 14(3), 283–298. [https://doi.org/10.1016/0260-4779\(95\)00064-X](https://doi.org/10.1016/0260-4779(95)00064-X)
- Mawhinney, J., Dlugogorski, B., & Kim, A. (1994). A Closer Look At The Fire Extinguishing Properties Of Water Mist. *Fire Safety Science*, 4, 47–60. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.4-47>
- Mawhinney, J. R., & Back III, G. G. (2016). *SFPE handbook of fire protection engineering* (Fifth edition). Springer.

- MSB. (2020). *Vägledning, räddningsinsats där litiumjonbatterier förekommer*.
- Naval Ship Code: Edition E Version 1*. (2014). NATO STANDARDIZATION AGENCY.
- NFPA. (2019). *NFPA 750: Standard on water mist fire protection systems 2019* (2019 edition). National Fire Protection Association.
- O'Connor, B. (2022, juni 24). *Water Mist Systems Overview / NFPA / NFPA*. Water Mist Systems Overview. <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/Blogs-Landing-Page/NFPA-Today/Blog-Posts/2022/06/24/Water-Mist-Systems-Overview>
- Palmberg, P., & Georgsson, H. (2008). *SCANDINAVIAN STAR Brand ombord 900407-900408 BRANDUTREDNING*. SWECO.
- Quintiere, B. K., James. (1999). *Enclosure Fire Dynamics*. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781420050219>
- Rahm, M., Claesson, A., Försth, M., & Ochoterena, R. (2014). *Tests of Fire Suppression Effectiveness of Damaged Water Mist Systems (P900035-05)*. SP.
- RMS-F*. (2013). Militära Sjösäkerhetsinspektionen.
- RMS-NSC*. (2013). Högkvarteret.
- RULES FOR CLASSIFICATION Naval vessels*. (2015). DNV GL.
- RULES FOR CLASSIFICATION OF SHIPS/HIGH SPEED, LIGHT CRAFT AND NAVAL SURFACE CRAFT*. (2005).
- Runefors, M. (2018). *Kompendium i Aktiva system—Sprinkler*.
- SAAB. (2020). *A submarine in space*. Start. <https://www.saab.com/newsroom/stories/2020/july/a-submarine-in-space>
- Scheffey, J. L. (2016). *SFPE handbook of fire protection engineering* (Fifth edition). Springer.
- Structure of IMO*. (2019, januari 1). IMO. <https://www.imo.org/en/About/Pages/Structure.aspx>
- Säfsten, K., & Gustavsson, M. (2020). *RESEARCH METHODOLOGY FORENGINEERS AND OTHER PROBLEM SOLVERS*. Studentlitteratur.
- Särdqvist, S. (2013). *Vatten och andra släckmedel*. Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB).

The submarine revolution: Lithium-ion battery system for a better performance. (2019).

<https://www.thyssenkrupp-marinesystems.com/en/teaser/the-submarine-revolution--lithium-ion-battery-system-for-a-better-performance>

Transportstyrelsens riktlinjer för elektrifiering av fartyg. (2023). Transportstyrelsen.

TSFS 2009:98, 2009:98 Transportstyrelsen (2009).

Ubåtssäkerhet: Krav och Rekommendationer (3.3). (2014). SPL M.

Valenti, A. (2022, oktober 20). Naval Group Continues Work on Lithium-Ion Batteries for

Submarines. *Naval News*. [https://www.navalnews.com/event-news/euronaval-](https://www.navalnews.com/event-news/euronaval-2022/2022/10/naval-group-continues-work-on-lithium-ion-batteries-for-submarines/)

[2022/2022/10/naval-group-continues-work-on-lithium-ion-batteries-for-submarines/](https://www.navalnews.com/event-news/euronaval-2022/2022/10/naval-group-continues-work-on-lithium-ion-batteries-for-submarines/)

Vesterholm, A. (2018). *TIFF träffar förbandschefen på FMTS*.

What is Aqueous Vermiculite Dispersion? (u.å.). AVD Fire. Hämtad 09 november 2023, från

<https://www.avdfire.com/what-is-aqueous-vermiculite-dispersion/>

Wienkonventionen för skydd av ozonskiktet. (1989). [https://www.naturvardsverket.se/om-](https://www.naturvardsverket.se/om-miljoarbetet/internationellt-miljoarbete/internationella-miljokonventioner/wienkonventionen-for-skydd-av-ozonskiktet/)

[miljoarbetet/internationellt-miljoarbete/internationella-miljokonventioner/wienkonventionen-](https://www.naturvardsverket.se/om-miljoarbetet/internationellt-miljoarbete/internationella-miljokonventioner/wienkonventionen-for-skydd-av-ozonskiktet/)

[for-skydd-av-ozonskiktet/](https://www.naturvardsverket.se/om-miljoarbetet/internationellt-miljoarbete/internationella-miljokonventioner/wienkonventionen-for-skydd-av-ozonskiktet/)

Willett, D. L. (2023, juni 1). Li-ion Batteries are Underwater ‘Game Changer’, says U212 NFS

Programme Manager. *Naval News*. [https://www.navalnews.com/event-news/cne-](https://www.navalnews.com/event-news/cne-2023/2023/06/li-ion-batteries-are-underwater-game-changer-says-u212-nfs-programme-manager/)

[2023/2023/06/li-ion-batteries-are-underwater-game-changer-says-u212-nfs-programme-](https://www.navalnews.com/event-news/cne-2023/2023/06/li-ion-batteries-are-underwater-game-changer-says-u212-nfs-programme-manager/)

[manager/](https://www.navalnews.com/event-news/cne-2023/2023/06/li-ion-batteries-are-underwater-game-changer-says-u212-nfs-programme-manager/)

Bilagor

Bilaga 1 Släckmekanismer

I detta delkapitel redovisas vattendimmas egenskaper och vad det har för inverkan på en brand. Det finns flera sätt som vattendimman påverkar branden.

Den första delen som tas upp är hur vattendimma kyler brandgaserna. Brandgastemperaturerna i en fullt utvecklad brand kan bli upp mot 700 – 1200°C (Quintiere, 1999). Vid dessa gastemperaturer kommer utrustning i takhöjd att ta skada om gaserna inte kyls. När man aktiverar ett vattendimsystem flödar mängder av små droppar in i utrymmet. När de kommer i kontakt med brandgaserna börjar vattendropparna att förångas. Desto mindre droppar ju mer ytarea blir det för samma volym av vatten. I Bilaga Tabell 1 Förhållandet mellan droppdiameter och antalet droppar. I Bilaga Tabell 1 åskådliggörs förhållandet mellan droppdiameter och antalet droppar. Log & Cannon menar att när vattendropparna har större ytarea krävs det mer energi från branden och brandgaserna för att förånga dropparna, vilket gör att branden tappar mer energi (1995). När brandeffekten reduceras sänks även temperaturen (J. R. Mawhinney & Back III, 2016). Eftersom vatten har en specifik värmekapacitet på $4,2 \frac{KJ}{kg \cdot K}$ och en ångbildningsvärme på $2,2 \frac{MJ}{kg}$ innebär det att det är just förångningen av vattnet som är mest energikrävande. För att få ett förhållande till hur stora dropparna är finns det en jämförelse i

Bilaga Tabell 2 mellan vattendimman och andra föremål.

$$\frac{V}{N} = \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$V = \text{Volymen för en droppe i } m^3$$
$$N = \text{Antal droppar}$$
$$r = \text{radie}$$

$$A_t = NA = \left(\frac{3V}{4\pi r^3}\right)(4\pi r^3) = \frac{3V}{r}$$

$$A_t = \text{Den totala ytarean som dropparna utgör i } m^2$$

Bilaga Tabell 1 Förhållandet mellan droppdiameter och antalet droppar.

| Antal droppar per liter vatten | Diameter (µm) |
|--------------------------------|---------------|
| $1,91 \cdot 10^6$ | 1000 |
| $1,53 \cdot 10^7$ | 500 |
| $1,91 \cdot 10^9$ | 100 |
| $1,53 \cdot 10^{10}$ | 50 |
| $1,91 \cdot 10^{12}$ | 10 |

Bilaga Tabell 2 Jämförelse mellan droppdiameter och andra föremål.

| Föremål | Storlek (µm) |
|-------------|--------------|
| Vattendimma | 10–1000 |
| Hårstrå | 17–180 |
| Sandkorn | 63–2000 |

När det kommer till att försöka avgöra hur mycket släckmedel som krävs för att släcka en brand kan REMP-värdet användas. REMP står för "required extinguishing medium portion". Det är ett mått på hur många gram släckmedel per sekund som behövs för släckning per gram bränsle som brinner per sekund. Enligt Särdaqvist (2013) har vatten ett REMP-värde på 2 - 40, men vattendimma har ett värde mellan 2 - 3. Den tidigare använda släckgasen Halon 1310 har ett värde mellan 4 - 5. Fler värden för andra släckmedel kan ses i Bilaga Tabell 3. Dessa värden är framtagna under ideala förhållanden. För en brand i ett större utrymme kommer detta värde att öka, eftersom den avviker från ideala förhållanden. Dock ger det en bra uppfattning i hur effektivt släckmedlet är.

$$REMP = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_f}$$

$\dot{m}_s = \text{Massavbrinning släckmedium}$

$\dot{m}_f = \text{Massavbrinning bränsle}$

Bilaga Tabell 3 REMP värde för olika släckmedel.

| Släckmedel | REMP |
|--------------------|---------|
| Pulver | 1 - 4 |
| Vatten | 2 - 40 |
| Inertgas | 10 - 12 |
| Haloner | 11 - 12 |
| Vattendimma | 2 - 3 |

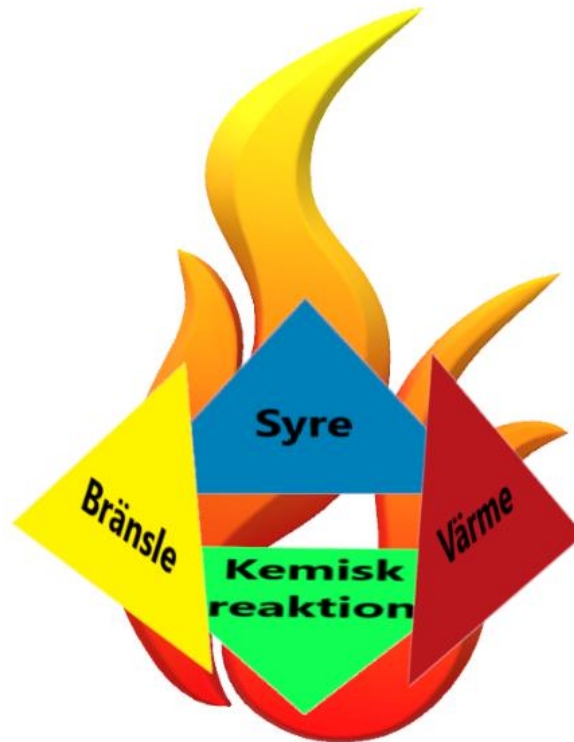
Den andra effekten är hur de små vattendropparna påverkar syrehalten i närheten av branden. När vattendropparna förångas ökar deras volym med ca 1700 gånger vid 100 °C och 1 Atmosfär. Detta leder till att syret i luft späds ut av vattenånga och syrehalten i förbränningsområdet sjunker. Om detta får fortgå under en längre tid kommer vattenånga att späda ut tillräckligt med luft så att branden inte kan fortsätta fortgå. Detta sker då syrekoncentrationen i luften understiger 13 procent (Log & Cannon-Brookes, 1995). De menar även att det är lättare att släcka branden genom kylning om den redan har dålig syretillförsel.

Om det är tillräckligt varmt kommer samma expansion av vattenånga ske i gasmolnet. Det medför att de brännbara gaserna blandas ut med vattenånga, vilket minskar risken för brandgasantändning.

Den tredje effekten vattendimma är att den väter ner och kyler bränsleytan. När dropparna faller på bränsleytan tar det som tidigare nämnt upp energi från branden. Detta reducerar i sin tur pyrolysen av brännbara gaser vid bränsleytan. Om detta får fortgå under längre tid kommer branden inte ha tillräckligt med energi för att kunna hålla i gång pyrolysen. Det kommer resultera i att branden inte kan överstiga den lägre brännbarhetsgränsen vid bränsleytan vilket resulterar i att branden slocknar. (J. R. Mawhinney & Back III, 2016)

Den fjärde effekten är inverkan på värmestrålningen. Vattendimman i utrymmet kommer att agera som en avskärmare mellan branden och omgivningen (Log & Cannon-Brookes, 1995). Detta kan skydda utrustning och icke antänt material i närheten. Enligt ett försök som genomfördes av National Research Council Canada (NRCC) minskar strålningsintensiteten mot omgivande väggar med 70 % (J. Mawhinney m.fl., 1994).

De ovanstående stegen i hur vattendimma påverkar branden är alla kopplade till brandtriangeln som åskådliggörs i Bilaga Figur 1 nedan. Brandtriangeln är uppbyggd av tre grunddelar. Det är syre, bränsle och värme. Samtliga behövs för att de kemiska reaktionerna ska kunna ske. Bränslet är den första delen, vilket är det material som brinner. Det kan både vara fasta material som trä och plast, men kan även vara gas eller vätskor. Den andra delen i triangeln är syre, som behövs för att de kemiska reaktionerna ska kunna fortgå. Den tredje delen är värme, som behövs främst för att ämnet ska nå sin antändningstemperatur. Det behövs även för att bränslet ska släppa ifrån sig brännbara gaser. Om någon av dessa tre tas bort eller inte existerar kommer branden inte kunna fortgå (Crowl & Louvar, 2002).



Bilaga Figur 1 Brandtriangeln