

Mätning av vattentäthet i vattendimma

Viktor Almén & Per Irwert

Department of Fire Safety Engineering
Lund University, Sweden

Brandteknik
Lunds Tekniska Högskola
Lunds Universitet

Report 5185, Lund 2007

Mätning av vattentäthet i vattendimma

Viktor Almén och Per Irwert

Lunds 2007

Measuring Water Density in a Water Mist

Mätning av vattentäthet i vattendimma

Report 5185
ISSN: 1402-3504
ISRN: LUTVDG/TVBB--5185--SE

Number of pages: 59
Language: Swedish
Illustrations: Per Irwert where nothing else is stated

Keywords

Water mist, Water density, Shepp-Logan, Mie scattering,

Sökord

Vattendimma, vattentäthet, Shepp-Logan, Mie-spridning

Abstract

This report describes experiments with a method for measuring water density in the spray from a water mist sprinkler using laser diodes. The decrease in light intensity at a photo cell across the spray from the diode is used to calculate the water density. The same method has previously been used for measuring the soot content of a flame, but the calculations when measuring water density are in some ways different. The report has two goals; one is to evaluate the method to see if it is adequate for measurements of this type, the other is to produce values of water density that can be used to evaluate CFD (Computational Fluid Dynamics) models. The conclusion stated in this report is that although the measurements carried out for this report are not very accurate, they are accurate enough for evaluating CFD models. A number of ways to make more exact measurements are also proposed. The report is written in Swedish.

© Copyright: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2007.

Brandteknik
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

brand@brand.lth.se
<http://www.brand.lth.se>

Telefon: 046 - 222 73 60

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

brand@brand.lth.se
<http://www.brand.lth.se/english>

Telephone: +46 46 222 73 60

Förord

Författarna skulle vilja tacka följande personer för ovärderlig hjälp med detta arbete:

Göran Holmstedt, Professor, Brandteknik LTH, handledare

Bjarne Husted, Doktorand, Brandteknik LTH, handledare

Ulf Göransson, Tekn. Dr., Brandteknik LTH, handledare

Sven-Ingvar Granemark, Forskningsingenjör, Brandteknik LTH, teknisk rådgivning

Berit Andersson, Universitetsadjunkt, Brandteknik LTH, examinator

Personalen på instrumentverkstaden, Fysicum, LTH

Torkel Dittmer, Brandskyddslaget, opponent

Trygg-Torkel, Barbar, Vårdshuset Galna Tunnan

Summary

Water mist is an extinguishing agent whose use is increasing rapidly due to its great effectiveness. However, there is a lack of codes and models for how to design water mist systems to extinguish or control fires. Today the only way to know how well a system works is to test it specifically for every environment where it is going to be used. A prerequisite for the creation of any design codes is a model which reliably can show what effect the water mist system will have in a real environment. Research has shown that one of the most important factors for the extinguishing capabilities of water mist is water density, i.e. the unit mass of water per unit volume of air. Research has also shown that as little water as 100-200 g/m³ is enough to extinguish a flame. The making of simulation models for water mist is in progress, but the behaviour of water mist is poorly recorded. To validate such models methods are needed for measuring how water from a water mist system is distributed in a room. The methods that exist today only work under laboratory conditions and can only provide single point measurements. No measurements have been made in full scale. The purpose of this report is to show that a method which has been successfully used for measurements of the soot content of a flame can, with certain modifications, be used to measure water density in a full scale setting. Values of water density in a water mist shall also be presented.

In the method used within this work, a spray from a water mist nozzle is crossed by a laser beam. The light from this laser creates a voltage in a detector. How high the voltage is depends on the light intensity. As the laser beam crosses the spray the intensity is dampened, and this dampening is used to calculate water density. In order to be able to carry out this calculation, the droplet size distribution of the spray and the light scattering properties of a water droplet must be known.

The conversion from damping of light intensity to water density is made with the following equation:

$$m^m = \frac{2 \cdot d_p \cdot K_{ext} \cdot \rho_{aq}}{3 \cdot Q_e \cdot f_e \cdot L},$$

where m^m is water density expressed in kg/m³, d_p is the average droplet diameter in m, ρ_{aq} is water density in kg/m³, Q_e is the extinction efficiency of the droplets, f_e is the fraction of the scattered light which hits the detector and L is the thickness of the spray. K_{ext} , extinction coefficient, is calculated in the following way:

$$\frac{I}{I_0} = e^{K_{ext}}$$

where I/I_0 is the damping of light intensity, i.e. the values measured with the detectors.

The experiments conducted within this work have been carried out at the Enoch Thulin Laboratory at Lund University. An arrangement has been constructed where a water mist nozzle can be moved in relation to firmly mounted measuring equipment. Also, a gas burner has been used for measurements of water density when the mist interacts with a fire. Because the nozzle can be moved in three dimensions the arrangement can be set up so that

measurements can be made right where the spray meets the fire plume. This has made it possible to evaluate the validity of the results.

The authors of the report conclude that the method and the values of water density presented are valid. The basis for this conclusion is that the following three conditions are all shown to be true:

1. Earlier cup burner tests have shown that a flame is extinguished at a water density of $0,1-0,2 \text{ kg/m}^3$.
2. When conducting the experiments for this report the flame from the burner has from time to time been extinguished, causing that that specific experiment has had to be restarted. This suggests that the water density during the experiments is close to extinguishing values.
3. The values of water density near the centre of the spray calculated from the experiments is ca $0,1-0,2 \text{ kg/m}^3$.

Even so, for future experiments with similar setups some suggestions for improvement are made:

- More lasers mounted tighter together.
- Measurement of droplet size distribution made at the same position relative to the nozzle as the measurements of water density are made.

Sammanfattning

Vattendimma är ett effektivt släckmedel vars användning ökar mer och mer. Problemet är att det saknas regler och modeller för hur sprinklersystem med vattendimma skall konstrueras och dimensioneras för att släcka eller begränsa en brand. För att man ska kunna veta om ett system fungerar måste man i dag testa det specifikt för varje enskilt utrymme där det skall användas. För att kunna sätta upp någon form av dimensioneringsregler behövs pålitliga modeller som kan visa hur vattendimman kommer att bete sig i ett brandrum. Forskning har visat att en av de viktigaste faktorerna för om vattendimman kan släcka en brand eller inte är vattentätheten, dvs hur många gram vatten per kubikmeter rumsvolym som brandrummet innehåller. Forskning har också visat att så lite vatten som 100-200 g/m³ är tillräckligt för släckning. Arbetet med att ta fram modeller för simulering av vattendimma pågår, men kunskapen om hur vattendimman beter sig är fortfarande bristfällig. Det behövs metoder för att mäta hur vattnet från en vattendimsprinkler fördelas i ett rum för att kunna validera modellerna. De mätmetoder för mätning av vattentäthet som används i dag fungerar endast under laborativa förhållanden och kan endast ge punktvärden. Det är svårt att mäta på försök i fullskala och över en större yta.

Syftet med detta arbete är att visa att en beprövad mätmetod för mätning av partikeltätheten i brandgaser, med vissa modifikationer, kan användas för att mäta vattentätheten som alstras av en vattendimsprinkler i fullskala. Mätvärden på vattentätheten i en vattendimma skall också presenteras.

Den metod som har använts går ut på att man låter en vattendimspray passera ett antal laserstrålar. Laserstrålarna träffar var sin fotocell där en spänning alstras. Denna spänning varierar beroende på hur stor ljusintensitet som träffar fotocellen. Skillnaden i spänning, som är direkt proportionell mot skillnaden i ljusintensitet, används i förlängningen till att räkna om ljusdämpning till vattentäthet. För att kunna utföra denna beräkning måste man känna till hur stora vattendropparna i sprayen är och hur ljus sprids av en vattendroppe av en viss storlek. För ljusspridningsberäkningarna används inom denna rapport programvaran Mieplot, som är framtagen för just detta syfte. Författarna har även haft tillgång till resultatet av en mätning av droppstorleksfördelningen som ges av just den sprinklerdysa som använts i försöken.

Omräkningen från dämpning av ljusintensitet till vattentäthet sker med formeln

$$m^m = \frac{2 \cdot d_p \cdot K_{ext} \cdot \rho_{aq}}{3 \cdot Q_e \cdot f_e \cdot L}$$

där m^m är vattentätheten i kg/m³, d_p är medeldroppdiametern i m, ρ_{aq} är vattnets densitet i kg/m³, Q_e är droppens utsläckningseffektivitet och talar om hur mycket ljus som droppen sprider, f_e är en faktor för hur mycket av det spridda ljuset som ändå träffar detektorn och L är tjockleken på sprinklersprayen. Q_e och f_e bestäms med hjälp av programvaran Mieplot. K_{ext} är kopplat till mätvärdena enligt följande:

$$\frac{I}{I_0} = e^{K_{ext}}$$

Där I/I_0 är dämpningen i ljusintensitet, dvs det som mäts med lasrarna.

De försök som gjorts inom detta projekt har genomförts på Enoch Thulin-laboratoriet vid Lunds Tekniska Högskola. Man har konstruerat och använt en försöksuppställning där sprinklerdysan kan flyttas i förhållande till fast monterad mätutrustning. Man har även använt en brännare för att kunna göra mätningar av vattentätheten då sprinklern verkar mot en brand. Tack vare att försöksuppställningen är konstruerad så att dysan kan flyttas relativt fritt har man kunnat ställa in uppställningen så att mätningarna gjorts just i det område där luftflödet som skapas av sprayen möter brandplymen från brännaren. Detta har också gett möjlighet att bedöma rimligheten i resultaten.

De slutsatser som dras är att metoden och de mätvärden som presenteras i rapporten är användbara baserat på att följande tre saker har visats gälla:

1. Tidigare tester med cup burner har visat att släckning av en flamma sker vid en vattentäthet på 0,1-0,2 kg/m³.
2. Vid försöken har flaman från brännaren då och då släckts, vilket orsakat att försök måste göras om. Detta tyder på att vattentätheten under försöken är nära släckgränsen.
3. De mätvärden som erhållits som resultat av försöken är i sprayens centrum ca 0,1-0,2 kg/m³.

Dock har man i förutsättningarna hittat saker som kan göras bättre om man i framtiden vill göra ytterligare försök. Dessa är:

- Fler och tätare placerade lasrar.
- Mätningar av droppstorleksfördelning gjorda på samma höjder som vattentäthetsmätningarna skall göras på.

Innehållsförteckning

1	Bakgrund	1
1.1	Syfte	1
1.2	Historik	1
1.3	Avgränsningar och antaganden	2
2	Metod	3
2.1	Mätmetoden	3
2.2	Omräkning av mätdata till vattentäthet	3
2.2.1	Droppstorlek, d_p	5
2.2.2	Utsläckningskoefficienten σ_e	5
2.2.3	Partikelns utsläckningseffektivitet, Q_e	6
2.2.4	Faktor f_e	6
2.3	Val av Laser	6
3	Försök	8
3.1	Försökupställning	8
3.2	Mätutrustning	10
3.3	Genomförande av försök	10
3.3.1	Kalibrering	10
3.3.2	Försöksserie 1	11
3.3.3	Försöksserie 2	11
4	Resultat	12
4.1	Medelvärdesbildning	12
4.2	Omräkning från spänning till dämpning	12
4.3	Beräkning av K_{ext}	12
4.4	Bestämning av övriga parametrar i ekvation [2.10]	13
4.4.1	Bestämning av L	13
4.4.2	Bestämning av d_p	14
4.4.3	Bestämning av Q_e	15
4.4.4	Bestämning av f_e	16
4.5	Beräkning av vattentätheten	16
5	Osäkerheter och känslighetsanalys	18
5.1	Osäkerheter	18
5.1.1	Droppstorleken, d_p	18
5.1.2	Utsläckningskoefficienten, K_{ext}	18
5.1.3	Vattens densitet, ρ_{aq}	18
5.1.4	Partikelns utsläckningseffektivitet, Q_e	18
5.1.5	Faktor f_e	19
5.2	Känslighetsanalys	19
5.2.1	Utsläckningskoefficienten K_{ext}	19
5.2.2	Faktorn f_e 's vinkelberoende	19
5.2.3	Övriga variabler i ekvation [2:10]	20
6	Diskussion	24
6.1	Resultaten	24
6.2	Uppställningen	24
6.3	Känslighetsanalysen	24
6.4	Vattentäthet nära brännaren	24
6.5	Multipelspridning	25
7	Slutsats	26
7.1	Mätmetodens användbarhet	26

7.2	Förbättringar inför nya försök	26
	Referenslista.....	27
	Appendix	29
	Bilaga I – Mjukvara	31
	I.1 Implog2000	31
	I.2 Picolog	31
	I.3 Matlab	31
	I.4 Mieplot.....	31
	I.5 @RISK.....	31
	I.6 Shepp-Logan.....	31
	Bilaga II - Försöksuppställningen.....	33
	Bilaga III – Indata till Matlab.....	35
	Bilaga IV – Resultat	37
	IV.1 Vattentäthetsdiagram för försöken med endast sprinkler	37
	IV.2 Vattentäthetsdiagram för försöken med både sprinkler och flamma	41
	Bilaga VI – CD-ROM.....	45

1 Bakgrund

1.1 Syfte

Vattendimma är ett effektivt släckmedel vars användning ökar mer och mer. Problemet är att det saknas regler och modeller för hur sprinklersystem med vattendimma skall utföras och dimensioneras för att släcka eller begränsa en brand. För att man ska kunna veta om ett system fungerar måste man i dag testa det specifikt för varje enskilt utrymme där det skall användas. För att kunna sätta upp någon form av dimensioneringsregler behövs pålitliga modeller som kan visa hur vattendimman kommer att bete sig i ett brandrum. Forskning har visat att en av de viktigaste faktorerna för om vattendimman kan släcka en brand eller inte är vattentätheten, dvs hur många gram vatten per kubikmeter rumsvolym som brandrummet innehåller. Forskning har också visat att så lite vatten som 100-200 g/m³ är tillräckligt för släckning (SFPE 2002). Arbetet med att ta fram modeller för simulering av vattendimma pågår, men kunskapen om hur vattendimman beter sig är fortfarande bristfällig. Det behövs metoder för att mäta hur vattnet från en vattendimsprinkler fördelas i ett rum för att kunna validera modellerna. De mätmetoder för mätning av vattentäthet som används i dag fungerar endast under laborativa förhållanden och kan endast ge punktvärden. Det är svårt att mäta på försök i fullskala och över en större yta.

Syftet med detta arbete är att visa att en beprövad mätmetod för mätning av partikeltätheten i brandgaser, med vissa modifikationer, kan användas för att mäta vattentätheten som alstras av en vattendimsprinkler i fullskala. Förutsatt att detta kan visas ska också mätvärden på vattentätheten presenteras.

1.2 Historik

Vatten är ett av de billigaste, effektivaste och mest använda släckmedlen på marknaden idag. Det faktum att vatten, till skillnad från många andra släckmedel, inte har några toxiska effekter på människa och miljö bidrar självklart också till den utbredda användningen. Släckning av brand med vatten är en kombination av tre effekter.

- Kylning av flamma och brandgaser genom förångning av vattnet,
- dämpning av strålningen från flaman till bränslet, samt
- kylning av bränsleytan.

Vilken av dessa effekter som har störst påverkan på släckningen finns det delade meningar om. Forskning har visat att vattnets släckningseffektivitet ökar ju mer finfördelat vattnet blir och laboratorietester har visat att så lite vatten som 100-200 gram vatten per kubikmeter rumsvolym kan släcka en vanlig diffusionsflamma. (SFPE 2002)

Ett problem med vattenbaserade släcksystem har alltid varit de skador som vattnet orsakar på byggnader och lösegendom. Vare sig det rör sig om fasta sprinklersystem eller räddningstjänstens släckutrustning så har kostnaderna för vattenskadorna stått för en stor del av efterkostnaderna vid brandtillbud. På räddningstjänstsidan har kunskapen om den höga släckeffekten hos finfördelat vatten blivit väl använd. Ny utrustning (40 bars högtryck t.ex.) och bättre kunskaper i strålförarteknik har gjort att räddningstjänsten blivit bättre på att utnyttja vattnets inneboende egenskaper. Tyvärr har det inte gått riktigt lika fort med utvecklingen av fasta installationer. Det billiga priset på vatten och användandet av haloner kan ses som bidragande orsaker till att fasta släcksystem med finfördelat vatten, så kallad vattendimma, utvecklats relativt långsamt.

Fram till 1990-talet var det framförallt inom marin verksamhet som vattendimma användes.

Det användes som ett alternativ till gasformiga släckmedel i utrymmen där dessa inte kunde användas pga. risken för personskador. De vattendimsystem som fanns inom landbaserad verksamhet var framförallt punktskyddssystem på restauranger och inom processindustri. Under slutet av 80-talet och början på 90-talet inträffade dock några saker som direkt bidrog till att vattendimman fick ett uppsving. Det första var att IMO (International Maritime Organisation) som är ett underorgan till FN, efter ett antal dödsbränder på passagerarfärjor utfärdade regler om att alla fartyg med kapacitet att ta 35 passagerare eller mer måste ha automatiskt brandsläckningssystem installerat i samtliga hytter och gemensamhetsutrymmen. Det andra var undertecknandet av Montreal-protokollet 1987 som satte restriktioner på tillverkning och användning av ozonnedbrytande substanser, vilket i praktiken satte stopp för användningen av haloner som släckmedel. Plötsligt fanns det behov av nya släcksystem som kunde ersätta halonerna och uppfylla kraven från IMO. Problemet med de befintliga släcksystemen som fanns på marknaden var att alla gasformiga släckmedelsalternativ var både skadliga för hälsan vid släckande koncentrationer, eller hade skadliga termiska nedbrytningsprodukter, och krävde stora mängder för att uppnå släckning vilket gjorde dem utrymmeskrävande. Konventionella sprinklersystem använder också stora mängder släckmedel (vatten) vilket gör dem svåra att göra mobila och riskerar att skapa stabilisationsproblem vid utlösning ombord på fartyg. Vattendimman visade sig vara lösningen på alla dessa problem. Vattendimman har en hög släckeffektivitet samtidigt som den begränsade vattenanvändningen minskar risken för vattenskadorna och gör det möjligt att bygga mobila system.

Allt detta har gjort att vattendimman börjat sitt inträde även på den landbaserade marknaden i större utsträckning än bara punktskydd. 2006 lanserades t ex den första boendesprinklerlösningen baserad på vattendimma på den svenska marknaden. Problemet är att det ännu inte finns några regler för hur vattendimsystem skall dimensioneras. De standarder och regler som finns i dag är framförallt framtagna av IMO och amerikanska National Fire Protection Association (NFPA 750) och styr t ex materialval, verkningstid och liknande men de tar inte upp hur systemen skall dimensioneras. Varje system måste således provas gentemot en trolig brand i den typ av utrymme det skall installeras i. Arvidsson och Herzberg har påtalat (2001) behovet av dimensioneringsregler för vattendimma likt de som finns för konventionella sprinkler i SBF 120:6. För att kunna sätta upp regler för hur dimensionering skall göras behövs tillförlitliga beräkningsmodeller och simuleringsmetoder för hur vattendimman beter sig. Arbetet med att ta fram denna typ av modeller pågår för närvarande bl.a. vid Lunds Universitet. För att kunna verifiera dessa modeller krävs mätdata från verkliga försök att jämföra med.

1.3 Avgränsningar och antaganden

Mätmetoden som testas i detta arbete kommer endast att testas gentemot en typ av munstycke (dysa). Spraykonen från dysan antas vara rotationssymmetrisk. Trots att flöden och tryck kan fluktuera något antas de ha konstanta medelvärden över tid.

Ingen hänsyn tas till eventuell multipelspridning av ljus, dvs. att ljus kan spridas av flera vattendroppar.

2 Metod

I detta avsnitt följer en beskrivning av den mätmetod som har använts samt hur mätdata behandlats.

2.1 Mätmetoden

Den mätmetod som skall testas inom detta arbete är en version av en beprövad mätmetod för partikelstätheten i brandgaser. Principen är att med hjälp av en laser och en detektor mäta hur stor del av laserljusets intensitet som absorberas av brandgaserna. Ljuset mäts enklast med hjälp av fotoceller som utvecklar en spänning då de träffas av ljus. För att beräkna hur många partiklar som finns i en laserstråle används skillnaden i spänning mellan en mätning där man har partiklar i ljusstrålen och en mätning utan partiklar, under förutsättning att partikelstorleken är känd. Mätvärdena räknas sedan om till en partikelstäthet. Samma metod torde kunna användas vid mätningar på vattendimman med vissa förändringar i beräkningarna och under antagandet att vissa förhållanden råder. Mätmetoden bygger på principen att partiklar i luften (vattendroppar i detta fall) absorberar och/eller sprider infallande ljus så att ljusintensiteten påverkas. En av de faktorer som måste tas hänsyn till vid beräkningarna är storleksskillnaden mellan sotpartiklarna i brandgaserna och dropparna i vattendimman. Sotpartiklarna har vanligtvis en diameter mellan 10-100 nm (Drysdale 2002) medan dropparna i vattendimma vanligen har en diameter på 10-100 µm dvs. närmare tusen gånger större. Lasrarna som används vid mätningarna har en våglängd på 670 nm (röd laser) vilket innebär att sotpartiklarnas diameter är mindre än våglängden medan vattendropparnas är betydligt större än ljusets våglängd. Detta betyder att då sotpartiklarna endast absorberar ljuset så kommer vattendropparna att reflektera det. Problemet går dock att komma runt. Andelen av ljuset som träffar droppen som absorberas är i förhållande till det som reflekteras så liten att det i mångt och mycket går att försumma, det är också, om droppstorleksfördelningen som sprinklern ger är känd, möjligt att välja en laser med en våglängd som ger så lite absorption som möjligt. Även om absorptionen kan försummas vid den valda våglängden återstår problemet med att bestämma hur vattendropparna sprider ljuset. Här finns dock hjälp att hämta från meteorologin. Beräkningsmodeller och modelleringsprogram finns tillgängliga som beräknar hur en droppe sprider ljus av en viss våglängd.

2.2 Omräkning av mätdata till vattentäthet

Följande avsnitt kommer behandla hur mätvärdena skall hanteras och behandlas. Fotocellerna ger som nämnts ovan ifrån sig en spänning då de träffas av en ljusstråle. Denna spänning är direkt proportionell mot intensiteten på infallande ljus. Skillnaden i spänning mellan mätning utan partiklar och med partiklar är således proportionell mot dämpningen av ljusintensiteten hos en ljusstråle som passerat genom ett område med partiklar. Detta betyder att

$$\frac{U_p}{U_0} = \frac{I}{I_0} \quad [2.1]$$

där U_p är spänningen uppmätt då partiklar stör strålen och U_0 är spänningen uppmätt vid ostörd ljusstråle. I/I_0 är dämpningen på ljusintensiteten.

Hur kan då denna dämpning i intensitet omräknas till en vattentäthet?

Vattentätheten, m^3 , i kg vatten per m^3 luft kan beräknas som antalet droppar per m^3 luft (N) multiplicerat med dropparnas medelvolymer (V_p) och densiteten för vatten ($\rho_{aq} = 1\,000\text{ kg/m}^3$).

$$m^m = N \cdot V_p \cdot \rho_{aq} \quad [2.2]$$

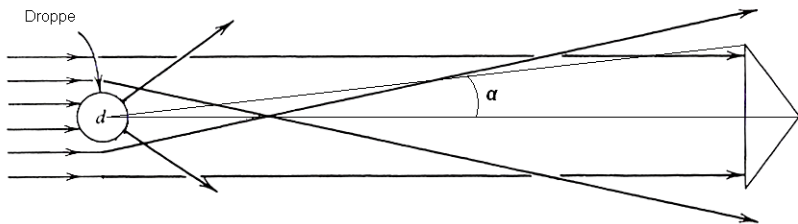
Antalet partiklar kan fås ur ekvationen

$$\sigma_e = N \cdot A_p \cdot Q_e \quad [2.3]$$

där σ_e är utsläckningskoefficienten (m^{-1}), A_p är dropparnas genomsnittliga tvärsnittsarea och

$$Q_e = \frac{\text{ljusintensiteten som sprids och absorberas av partikeln}}{\text{ljusintensiteten som faller in mot partikeln}}. \quad [2.4]$$

Q_e är en faktor som beskriver droppens utsläckningseffektivitet, d.v.s. hur mycket ljus som bryts av droppen i förhållande till hur mycket ljus som faller in mot droppens tvärsnittsarea. Q_e varierar mellan 0 och 5 beroende på droppens storlek, men för droppar med en diameter större än $2 \mu m$ är värdet ca 2. Att det ljus som bryts inte är det samma som faller in mot droppen beror på att droppen även bryter de ljusstrålar som passerar precis utanför droppen. Detta fenomen kallas *extinction paradox*. (Hinds, 1982)



Figur 1: Extinction paradox. Adapted from Hinds (1982).

Ekvation [2.4] visar hur dropparnas storlek och antal påverkar ljuset. Det som dock inte ekvationen tar hänsyn till är det faktum att en viss del av det ljus som sprids av droppen kommer fortfarande att träffa fotocellen. För att kunna ta hänsyn till detta införs härmed faktorn f_e som är

$$f_e = 1 - \frac{\text{ljusintensiteten som sprids men fortfarande träffar detektorn}}{\text{ljusintensiteten som sprids och absorberas av partikeln}}. \quad [2.5]$$

Denna faktor tillförs ekvation [2.3] och istället erhålls följande

$$\sigma_e = N \cdot A_p \cdot Q_e \cdot f_e \quad [2.6]$$

Genom att kombinera ekvation [2.6] och ekvation [2.2] erhålls ett nytt uttryck för vattentätheten;

$$m^m = \frac{2 \cdot d_p \cdot \sigma_e \cdot \rho_{aq}}{3 \cdot Q_e \cdot f_e}. \quad [2.7]$$

För att kunna använda ekvation [2.7] måste några av de ingående parametrarna uträknas utifrån mätdata eller optiska data för vattendroppar.

2.2.1 Droppstorlek, d_p

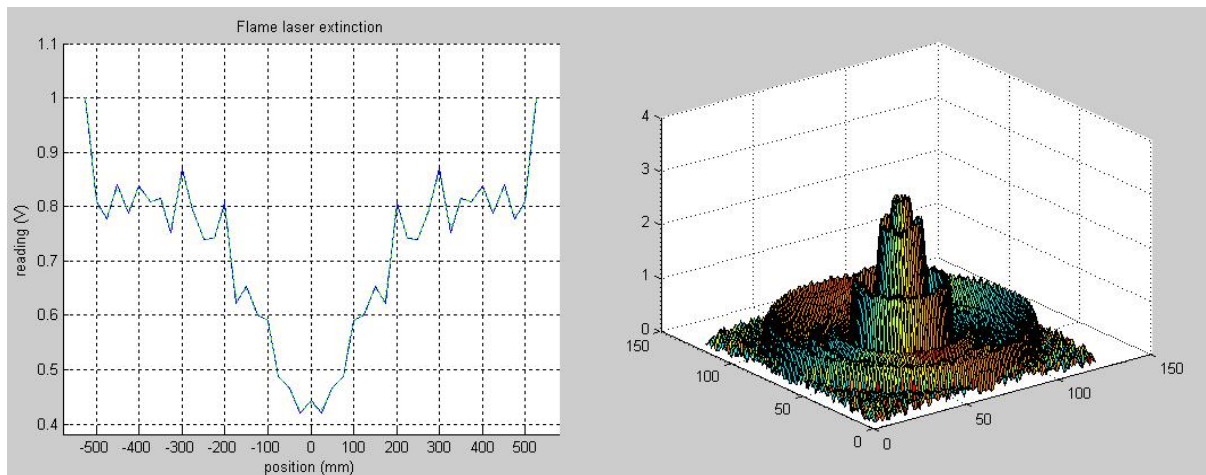
För att kunna använda ekvation [2.7] behöver en partikeldiameter bestämmas. Det finns metoder som kan användas för att räkna antalet droppar i en vattendimma och se vilken storlek de har. En av dessa är Phase Doppler Anemometry (PDA) som mäter fasförskjutningen på laserljus som passerat en spray. Mätvärdena kan sedan användas för att bestämma den medeldiameter som passar för beräkningarna.

2.2.2 Utsläckningskoefficienten σ_e

Utsläckningskoefficienten, σ_e , kan bestämmas med följande ekvation;

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\sigma_e \cdot L} \quad [2.8]$$

där L är avståndet som ljusstrålen har färdats genom aerosolen. Detta medför att mätvärdena från fotocellerna kan omvandlas så att σ_e kan bestämmas. Här uppstår dock ett problem. Dämpningen av laserstrålens intensitet som erhålls talar endast om hur mycket vatten som finns i ett tvärsnitt av sprayen. För att kunna använda mätvärdena till kontroll av simuleringsverktyg måste de på något sätt kunna omvandlas så att de representerar värden för varje punkt i sprayen. Detta kan göras med samma princip som används inom sjukvården vid bl.a. datortomografi. Eftersom en vattendimmesprinkler kan antas vara rotationssymmetrisk, åtminstone sett över tiden, blir beräkningarna i detta fall enklare än för en datortomograf. På ett rotationssymmetriskt objekt räcker det med mätningar i en riktning. Dessa kan sedan antas gälla för samtliga riktningar genom objektet. Principen kallas för Shepp-Logan (Shepp L. A., Logan B. F., 1974) och är en beprövad modell för omvandling av tvådimensionell mätdata till en tredimensionell bild (i detta fall en bild med två rumsdimensioner och utsläckningskoefficienten).



Figur 2: Till vänster indata till Shepp-Logan-modellen och till höger utdata.

För beräkningarna har en matematisk modell till programvaran Matlab använts. Modellen har tidigare använts för beräkningar på sot men principen och ekvationerna är samma för vattendimma. För att indatan till modellen skall representera verkligheten i så stor utsträckning som möjligt tas ett medelvärde över tiden av de data som erhålls ur försöken. Modellen gör en omräkning av mätvärdena utifrån ekvation [2.8] och gör sedan en Shepp-Logan beräkning på dem. Det värde modellen ger som utdata är

$$K_{\text{ext}} = \sigma_e \cdot L. \quad [2.9]$$

För att kunna använda dessa värden direkt krävs en mindre justering av ekvation [2.7]. Den nya ekvationen blir

$$m''' = \frac{2 \cdot d_p \cdot K_{\text{ext}} \cdot \rho_{\text{aq}}}{3 \cdot Q_e \cdot f_e \cdot L}. \quad [2.10]$$

De parametrar som återstår att bestämma är Q_e och L . Värdet på L beror på spraykonens diameter och kommer att bestämmas ur försöken.

2.2.3 Partikelns utsläckningseffektivitet, Q_e

Som ekvation [2.4] anger beror Q_e på dropparnas sätt att sprida och absorbera det ljus som träffar dem. Vattendroppar sprider ljus genom något som kallas för Mie-spridning och är ett välkänt fenomen inom meteorologin. Vattendroppars spridning av ljus är ett så pass väl studerat område att det finns färdiga beräkningsprogram för Mie-spridning. Ett av dessa är Mieplot som framarbetats av Philip Laven (Laven) och det är detta program som använts till detta arbete.

Mieplot räknar ut och åskådliggör grafiskt hur stor andel av ett infallande ljusknippe som sprids och absorberas av en vattendroppe och i vilken riktning spridningen sker. Programmet ger möjlighet att variera bl.a. droppens diameter, omgivande medium, ljuskällans våglängd och omgivande temperatur. Det går också att variera om programmet skall illustrera andelen av intensiteten eller W/m^2 gentemot spridningsvinkel för en enstaka droppe eller, om man har en variabel droppstorlek, hur intensiteten varierar beroende på diameter osv. Det går också att räkna på hur hög intensitet som träffar en cirkelbåge på ett givet avstånd från droppen. Denna möjlighet har använts för denna rapport.

Mieplot beräknar hur stor intensitet som träffar varje punkt, ner till $0,01^\circ$, på en cirkelbåge från 0 till 180° i ett plan. Den kurva som erhålls kan sedan integreras över ytan på en sfär för att man ska erhålla den totala ljusintensiteten på en sfär med centrum i droppen. För detta arbete har sfärens radie satts till 1 m för att förenkla beräkningarna. Denna totala intensitet sätts in som täljare i ekvation [2.4]. Nämnaren i ekvationen är den ljusintensitet som träffar droppens tvärsnittsarea. Detta värde kan bestämmas genom att låta Mieplot beräkna W/m^2 som funktion av spridningsvinkel. Denna inställning gör det nämligen möjligt att definiera infallande ljusstyrka.

2.2.4 Faktor f_e

Denna faktor varierar både beroende på droppstorleken, försökupställningens utformning och valet av laser. Hur mycket av ljuset som sprids och i vilken vinkel varierar beroende på droppens storlek och ljusets våglängd, därför kommer andelen som sprids mot detektorn också variera. Vad gäller uppställningens utförande är det framförallt avståndet mellan droppen och detektorn samt detektorns diameter som avgör inom hur stor vinkel som ljuset detekteras.

2.3 Val av Laser

Som nämnts ovan går det att genom ett bra val av våglängd på lasern eliminera absorption vid mätningarna på vattendimman. Detta går att göra genom att studera ljusets brytningsindex mellan luft och vatten. Brytningsindexet består av en reell del och en imaginär del. Den reella delen av brytningsindex talar om hur ljuset bryts och sprids vid övergången mellan två medier medan den imaginära delen talar om hur mycket som absorberas vid övergången.

Brytningsindexet varierar beroende på våglängd och vilka medier som är inblandade. Tricket för att eliminera absorptionen och därmed minimera osäkerheten i beräkningarna, är alltså att välja en laser med en våglängd vars brytningsindex har en imaginär del som är så nära noll som möjligt.

En annan aspekt som har en viss betydelse vid val av laser är att laserstrålens diameter bör vara mycket större än vattendropparnas diameter. Detta för att undvika randeffekter av droppar som bara delvis träffas av ljuset. I detta arbete är ljusstrålens diameter ca 60 ggr större än dropparnas.

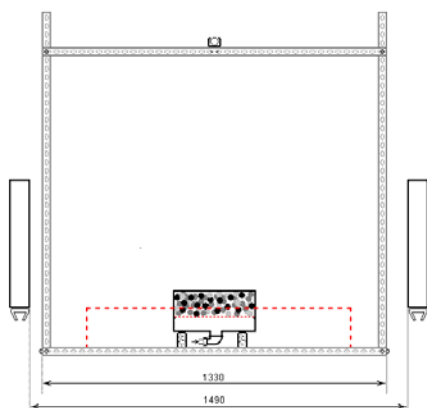
3 Försök

De försök som gjorts inom detta arbete har genomförts på Enoch Thulin-laboratoriet vid Fysicum, Lunds Universitet. Nedan följer en redovisning av hur försöksuppställningen var uppbyggd och hur själva försöken utfördes.

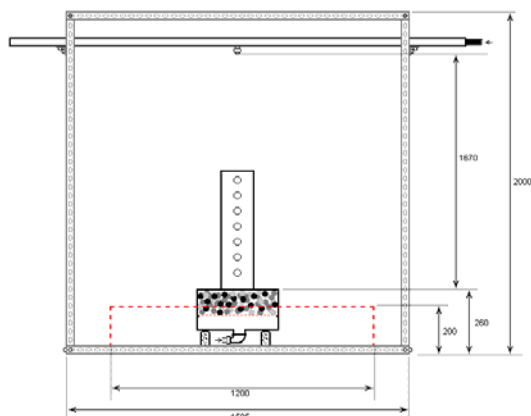
3.1 Försöksuppställning

I den lokal som användes för försöken finns sedan tidigare en anordning som gör det möjligt att blåsa in luft från golvet under en försöksuppställning. Denna anordning består av en ca 60 cm hög 3*3 m träkonstruktion som på väggarnas insida är klädd med plast. Insidans ovan del är klädd med en textilväv som fördelar luftflödet jämnt över ytan då en fläkt blåser in luft i anordningen. Ovanför textilväven finns ett gallergolv. Över denna konstruktion finns en ventilationshuv som ventilerar ut brandgaser i det fria. Den fläkt som blåser in luft underifrån tar sin luft från rummet, och tillför alltså inte någon ny luft.

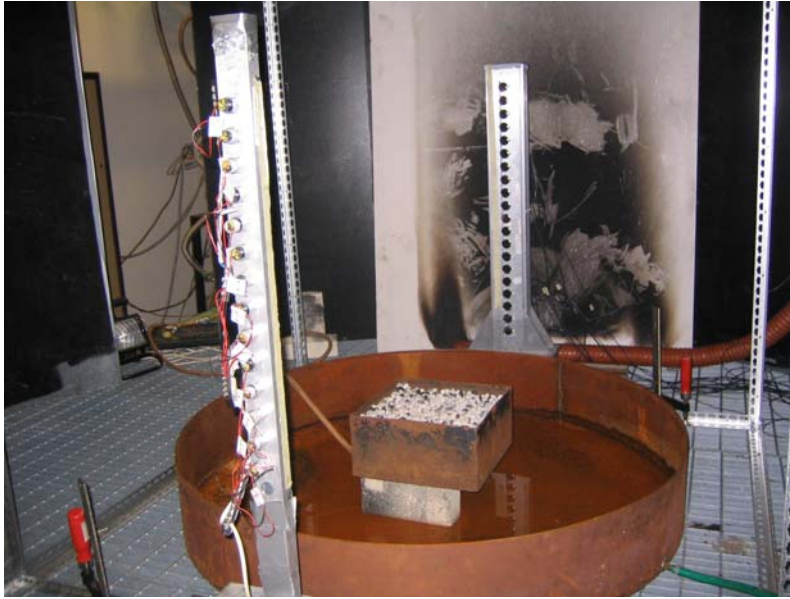
På den befintliga anläggningen byggdes sedan den uppställning som användes för detta arbete. Den bestod av en ställning (figur 3 och 4) av stålprofiler som förankrades i gallergolvet. I denna ställning kan sprinklerhuvudet flyttas i både höjd- och sidled. Fler bilder finns i Bilaga II.



Figur 3: Försöksuppställningen. I mitten syns brännaren, på höger och vänster sida mätutrustningen den streckade linjen representerar ett kärl för uppsamling av vatten som brännaren stöd i, överst i mitten sitter sprinklerhuvudet, måtten är angivna i mm. (OBS! Ritningen är ej skalenlig.)



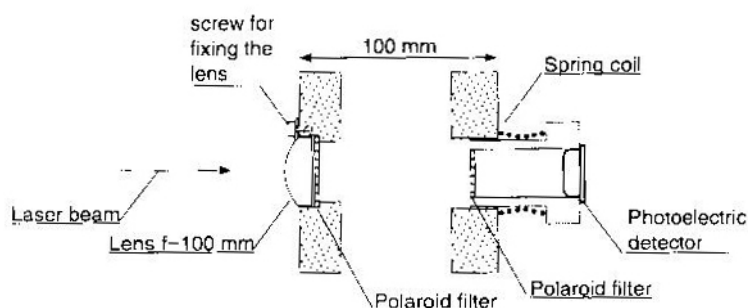
Figur 4: Försöksuppställningen. Samma uppställning som i figur 3 men vriden 90°, måtten i mm (OBS! Ritningen är ej skalenlig.)



Figur 5: Foto på försöksuppställningen. Pelaren bortanför brännaren är den ställning där detektorerna är monterade.

Själva mätutrustningen bestod av samma laserdioder som Andersson använde vid sina mätningar på brandgaser (Andersson 1997). Dessa monterades i vertikalled i en ställning med 4 cm mellanrum (se Figur 5).

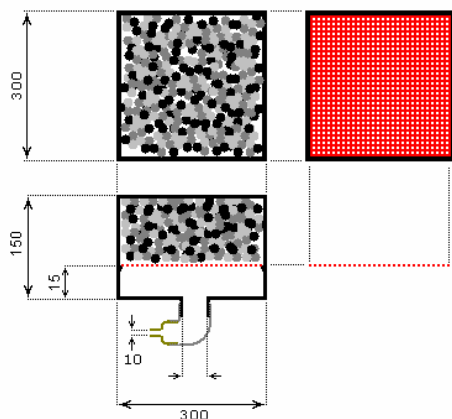
Lika många fotoceller monterades i en liknande ställning, vilken dock var försedd med linser i framkant samt polariserande filter som ger möjlighet att justera intensiteten på det ljus som träffar fotocellen (se Figur 6).



Figur 6: Montering av fotocell (Andersson 1997).

Anledningen till att det finns ett behov av att kunna justera ljusstyrkan är att det finns en övre gräns för hur stark signal fotocellen kan mäta. De två ställningarna monterades mitt emot varandra och förankrades i golvet för att stå stabilt, varpå laserna och fotocellerna justerades in så att ljuset träffade så mitt på fotocellerna som möjligt och bra värden erhöles från dessa. För att undvika att denna tidsödande justering skulle behöva göras flera gånger fick ställningarna för dioder och fotoceller vara fast placerade genom samtliga försök som genomfördes. Då mätningar skulle göras i olika delar av sprayen flyttades i stället brännaren och den ställning där dysan var monterad.

Brännaren som användes var en bottenmatad kvadratisk gasbrännare (se Figur 7). Den var försedd med ett stålnät i botten på vilken ett lager grus lades för att fördela gasen någorlunda jämt över brännarens yta



Figur 7: Brännaren med mått angivna i mm.

3.2 Mätutrustning

Det finns flera märken och varianter på olika mätutrustningar för denna typ av försök på marknaden. Vilken som används är egentligen egalt. Det viktiga är att utrustningen klarar av att logga förändringar i spänning med högre frekvens än de små fluktuationer som finns inbyggda i systemet, t.ex. de fluktuationer i vattentryck som pumpen ger upphov till. Vid Institutionen för brandteknik vid Lunds Tekniska Högskola fanns sedan tidigare datainsamlingsverktyget Implog2000 med tillhörande hårdvara. Implog kräver ett speciellt kort i datorn och en extern insamlingsenhet. Totalt 20 kanaler kan kopplas till en insamlingsenhet och det är också möjligt att seriekoppla två enheter för att få fler kanaler. Denna användes initialt vid försöken men det visade sig snart att loggningsfrekvensen för denna utrustning var för låg för att klara av att mäta ovan nämnda fluktuationer. Därför införskaffades loggningsutrustningen Picolog. Hårdvaran till Picolog kräver inget speciellt kort i datorn utan kan anslutas direkt till datorn via USB- eller parallellport beroende på vilken version man införskaffar. (Bilaga I)

3.3 Genomförande av försök

3.3.1 Kalibrering

Kalibrering av brännare och sprinkler genomfördes genom att olika gasflöden, olika sprinklermunstycken och olika avstånd mellan brännaren och sprinklermunstycket provades tills stationära förhållanden kunde bibehållas. Visserligen fluktuerar flammen mycket då den påverkas av sprayen, men stationära förhållanden ansågs råda då flammen kunde anses vara någorlunda konstant över tid. Förutom detta var ett mål att förhållandet mellan gas- och vattenflöde skulle vara sådant att flammen nästan släcktes, och ett annat mål att de två flödena, luftflödet som skapas av sprinklern och brandplymen, skulle mötas i det område där laserstrålarna fanns. Resultatet av kalibreringen blev:

- Sprinklerdysa: Danfoss 1911, hollow cone, vattenflöde 0,42 l/min vid 100 Bar.
- Avstånd brännare – sprinklerdysa: 1670 mm.
- Gasflöde: 0,88 g/s.

3.3.2 Försöksserie 1

I denna försöksserie användes mjukvaran Implog2000 tillsammans med de tillbehör som beskrivs i kapitel 3.2. Det första försöket gjordes med dysan centrerad ovanför brännaren. Sedan flyttades uppställningen 5 cm i förhållande till mätutrustningen och ett nytt försök genomfördes osv. På detta sätt gjordes mätningar varje 5 cm från sprayens centrum ut till och med 40 cm från centrum. Vid försöken startades först mätningen, sedan tändes brännaren och slutligen startades sprinklern. Mätningen pågick i två minuter från det att sprinklern startades. De värden som erhöles från tiden innan brännaren tändes användes som nollvärde vid beräkning av dämpningen. Från dessa försök kunde slutsatsen dras att försöken är repeterbara, men loggningsfrekvensen (strax över 1 Hz) ansågs för liten för att ge bra resultat.

3.3.3 Försöksserie 2

I denna serie försök användes mjukvaran Picolog med tillhörande hårdvara. Picolog ställdes in så att det på så kort tid som möjligt skulle registrera tio tusen mätvärden för varje kanal, vilket visade sig ta ca tolv sekunder (knappt 1 000 Hz). Själva försöken genomfördes så att sprinklern och brännaren (eller bara sprinklern i vissa försök) startades först. Då stabila förhållanden uppnåtts startades mätningen. I denna serie gjordes mätningar varje 2,5 cm ut till och med 50 cm. Eftersom sprinklern redan var igång då mätningen startades gjordes en mätning utan vare sig brännare eller sprinkler för att användas som nollvärde vid beräkning av dämpningen. De resultat som presenteras i denna rapport bygger på denna försöksserie.

4 Resultat

I detta kapitel kommer de värden som erhållits ur försöken omräknas på det sätt som beskrivs i kapitel 2 i denna rapport. Här redovisas dock bara beräkningsgången för mätvärden från en mätkanal, dvs. en höjd över brännaren. För övriga kanaler återfinns resultatet av varje beräkning i Bilaga IV. De värden som redovisas i detta kapitel är tagna för kanal 1, dvs. den kanal som är högst upp i uppställningen.

4.1 Medelvärdesbildning

Det första steget i beräkningsgången är att för varje kanal i varje försök bilda ett medelvärde över tiden. Detta görs helt enkelt genom att summera spänningarna för alla mätpunkter och dividera med antalet mätpunkter. Detta värde sätts in som U i ekvation [2.1].

4.2 Omräkning från spänning till dämpning

Ett av försöken genomfördes utan vare sig sprinkler eller flamma, och detta försök används som nollvärde. Detta innebär att nollvärdet anses representera en obruten ljusstråle, dvs. värdet sätts in som U_0 i ekvation [2.1]. Sedan divideras medelspänningen U för varje kanal i varje försök med U_0 för att få fram medeldämpningen. Mätningarna gjordes från mitten av spraykonen ut till 50 cm från centrum. Nollvärdet används sedan som om det var en mätning 52,5 cm från sprayens centrum. På detta avstånd kan luftens vatteninnehåll antas vara försumbart. Eftersom sprayen kan antas vara rotationssymmetrisk kan ett tvärsnitt av spraykonen åskådliggöras i följande diagram

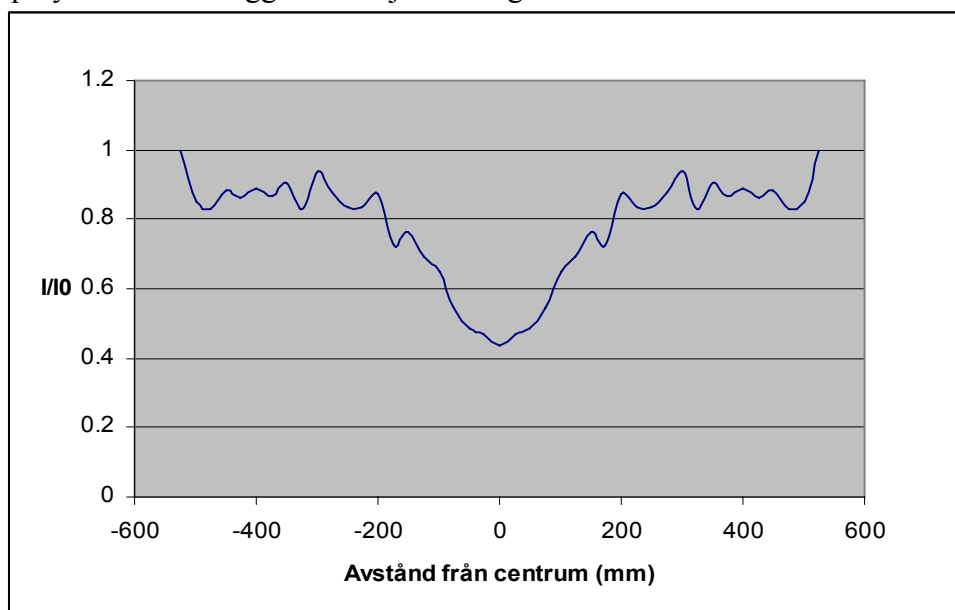


Diagram 1: I/I_0 på olika avstånd från sprayens centrum.

4.3 Beräkning av K_{ext}

Värdena som redovisas i Diagram 1 placeras i en txt-fil (se Bilaga III) och läses in i Shepp-Logan koden till Matlab (se Avsnitt 2.2.2). Från Matlab erhålls värden i Diagram 2.

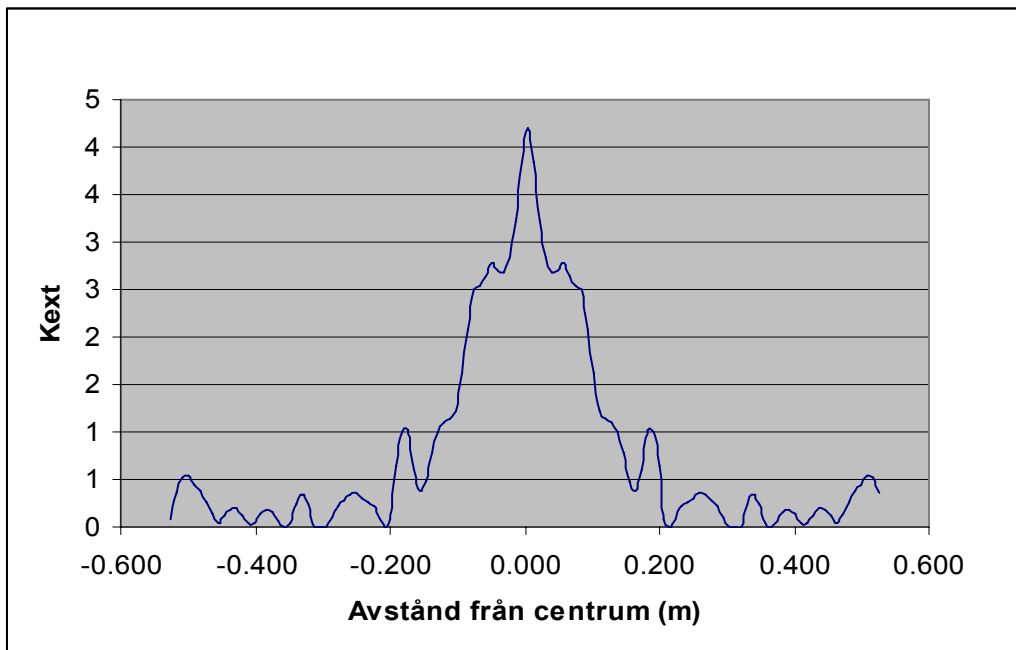


Diagram 2: K_{ext} på olika avstånd från sprayens centrum.

Mätvärdena erhålls också i form av en ny txt-fil. Mätdata från Matlab sätts sedan in i ekvation [2.10].

4.4 Bestämning av övriga parametrar i ekvation [2.10]

De parametrar som måste bestämmas är L , d_p , Q_e och f_e . Densiteten för vatten är definierad sedan tidigare och sattes då till $1\,000\text{ kg/m}^3$.

4.4.1 Bestämning av L

L är avståndet som ljusstrålen har färdats genom aerosolen och bestämdes genom att okulärt studera var huvuddelen av vattendropparna befann sig under försöken. Det var tydligt att det mesta av vattnet formade en cylinder med en diameter på några decimeter. Diametern bestämdes genom att studera diagram över K_{ext} . Man kan även där se att huvuddelen av ljusdämpningen sker inom ett begränsat område i sprayen. Diametern på detta område skiljer sig något mellan de försök som har gjorts med och utan flamma. Med flamma är diametern på området ca 0,5 m och utan flamma ca 0,4 m. Detta åskådliggörs i Diagram 3 och Diagram 4 nedan.

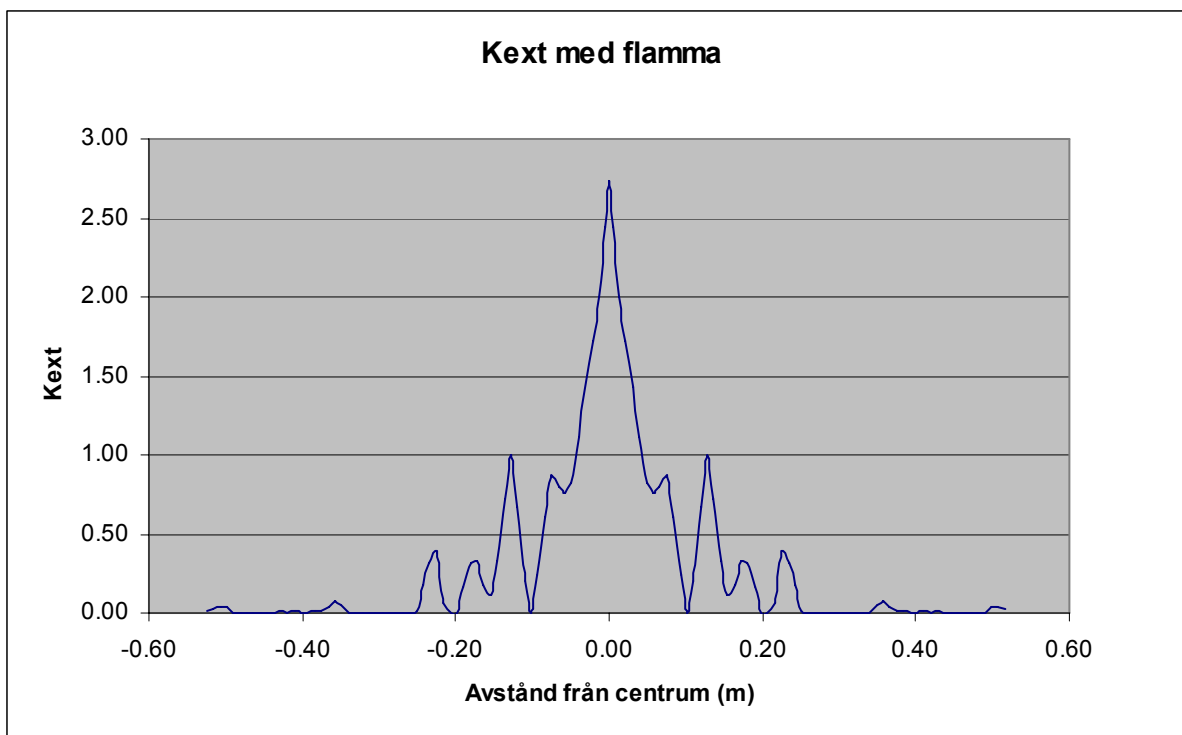


Diagram 3: Vattentäthet där brännare har använts. Man kan se att nästan inget vatten finns längre från sprayens centrum än ca 25 cm.

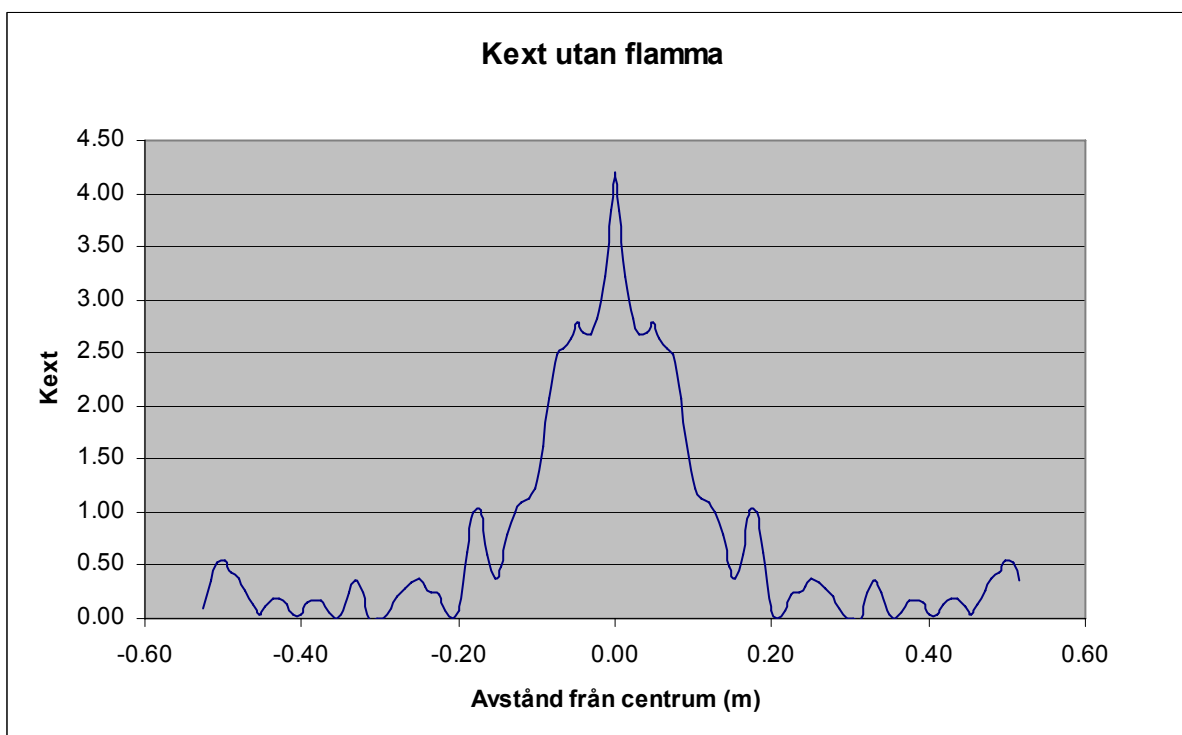


Diagram 4: Vattentäthet där ingen brännare har använts. Nästan inget vatten finns mer än ca 20 cm från sprayens centrum.

4.4.2 Bestämning av d_p

Bjarne Husted vid Institutionen för Brandteknik vid Lunds Universitet har gjort PDA-mätningar på den sprinklerutrustning som använts inom detta arbete. Resultatet från hans mätningar syns i Tabell 1 nedan.

Tabell 1: Droppdiameter i μm mätt med PDA.

	2.5 cm	5 cm	10 cm	15 cm	30 cm	50 cm
dv01	17.78	23.22	22.59	30.54	25.10	23.64
dv05	27.62	35.36	39.54	46.44	46.03	48.33
dv09	35.98	49.16	51.88	57.53	62.34	65.27

Förklaring till Tabell 1:

dv01 = 10% av dropparna har en diameter som är mindre eller lika

dv05 = 50% av dropparna har en diameter som är mindre eller lika

dv09 = 90% av dropparna har en diameter som är mindre eller lika

De mätningar som gjorts inom ramen för detta arbete har gjorts på avstånd större än 50 cm från dysan. Dropparna kan antas koagulera ihop med varandra och bli större ju längre från dysan de kommer under förutsättning att de inte förångas. I beräkningarna kommer droppdiametern antas ha följande värden $dv01 = 25 \mu\text{m}$, $dv05 = 50 \mu\text{m}$, $dv09 = 75 \mu\text{m}$.

4.4.3 Bestämning av Q_e

Värdena för d_p och våglängden för laserljuset sätts in i Mieplot, som beräknar ljusspridningen från en droppe i alla riktningar (se kap 2.2.3 och Diagram 5).

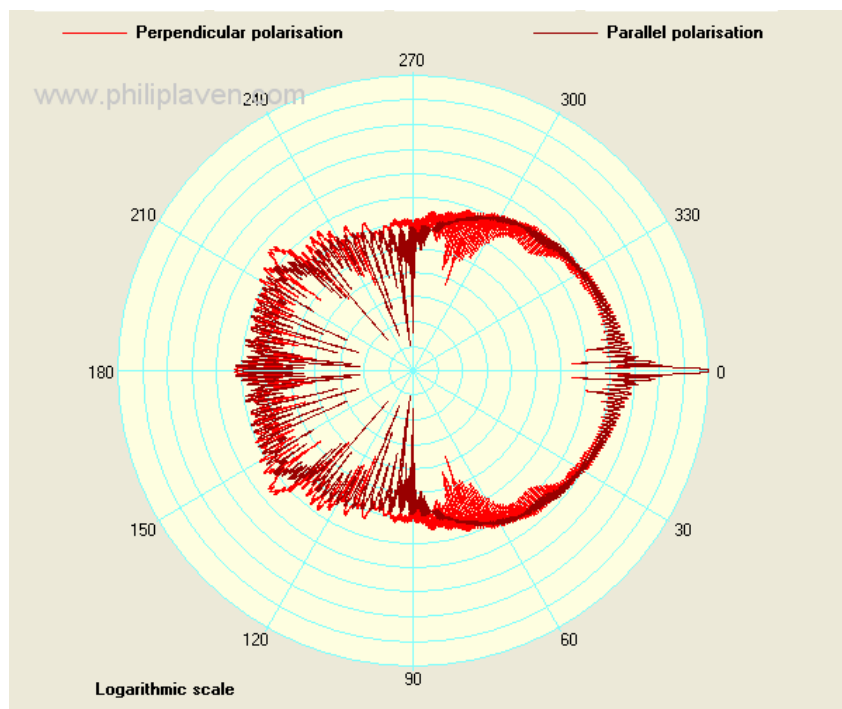


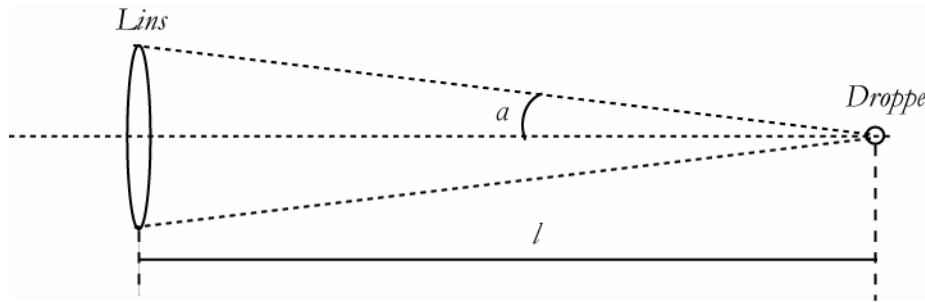
Diagram 5: Exempel på utdata från Mieplot. Det som visas är ljusintensitet som funktion av vinkeln mellan infallande och reflekterat/spridd ljus. Skalan är logaritmisk.

Den integrering som beskrivs i kapitel 2.2.3 görs i Matlab och den summa som erhålls divideras med den totala intensitet som faller in mot droppens tvärsnittsarea, enligt ekvation [2.4].

$$Q_e = \frac{\text{ljusintensiteten som sprids och absorberas av partikeln}}{\text{ljusintensiteten som faller in mot partikeln}} = \frac{4,0998 \cdot 10^{-9}}{1,9635 \cdot 10^{-9}} = 2,088$$

4.4.4 Bestämning av f_e

För att bestämma f_e måste mätningar av uppställningen göras för att få fram den vinkel α inom vilken ljus spritt från droppen fortfarande träffar detektorn. Denna beror självklart på avståndet mellan droppen och detektorn men har här satts till avståndet från centrum av konen till detektorn, vilket kan anses vara ett medelavstånd.



Figur 8: Bakgrund för beräkning av vinkeln inom vilken spritt ljus träffar detektorn.

Avståndet l sätts till avståndet från centrum av sprayen till detektorn dvs $l = 745$ mm. Detektorlinsen är 30 mm i diameter. Vinkeln blir således

$$\alpha = \arctan\left(\frac{15}{745}\right) = 1,15^\circ$$

När vinkeln α har bestämts integreras utdatan från Mieplot (kapitel 4.4.3) mellan noll och α . Denna summa samt resultatet av den integrering som gjordes i kapitel 4.4.3 sätts in i ekvation [2.5].

$$f_e = 1 - \frac{\text{ljusintensiteten som sprids men fortfarande träffar detektorn}}{\text{ljusintensiteten som sprids och absorberas av partikeln}} = 1 - \frac{1,8076 \cdot 10^{-9}}{4,0998 \cdot 10^{-9}} = 0,559$$

4.5 Beräkning av vattentätheten

När alla parametrar har bestämts kan värdena sättas in i ekvation [2.10]:

$$m^m = \frac{2 \cdot d_p \cdot K_{ext} \cdot \rho_{aq}}{3 \cdot Q_e \cdot f_e \cdot L} = \frac{2 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \cdot K_{ext} \cdot 1000}{3 \cdot 2,088 \cdot 0,559 \cdot 0,4}$$

Denna beräkning görs för varje punkt på sprayens centrumlinje, och värdet på k_{ext} är de värden som redovisas i Diagram 2. Detta ger en vattentäthet enligt Diagram 6.

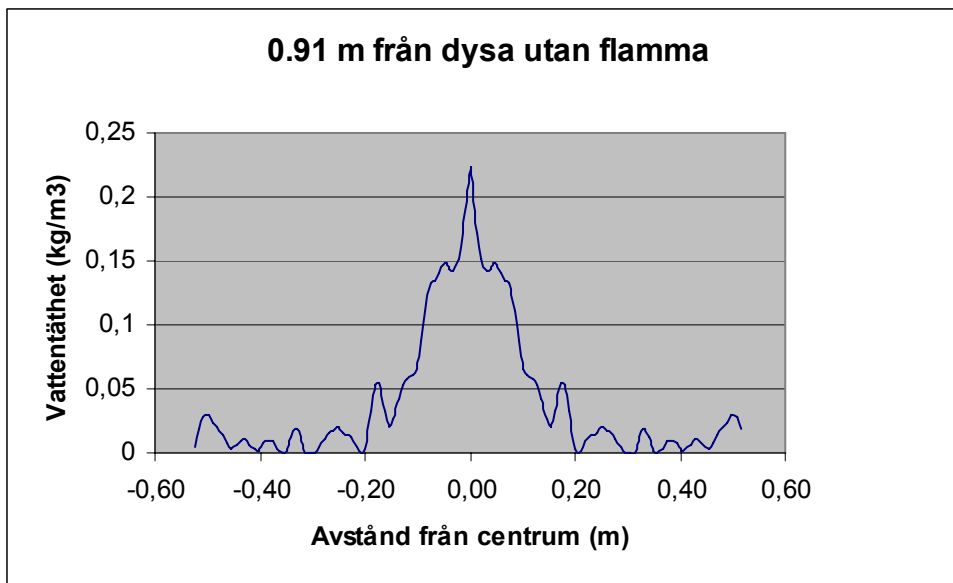


Diagram 6: Vattentäthet som funktion av avståndet från sprayens centrum.

5 Osäkerheter och känslighetsanalys

Detta avsnitt kommer att behandla inbyggda osäkerheter i mätmetoden och hur dessa påverkar resultaten.

5.1 Osäkerheter

Här diskuteras vilka osäkerheter som finns inbyggt i mätmetoden och hur de påverkar de variabler som ingår i ekvation [2.10].

5.1.1 Droppstorleken, d_p

Droppstorleken är en av de mest avgörande variablerna för att resultaten av mätmetoden skall bli bra. Att prata om en enskild droppstorlek är i sig själv en förenkling. En sprinkler ger ifrån sig en spray av droppar av olika storlek och beroende på hur storleken mäts och vilken formel som används vid beräkning av medelstorleken kan värdena variera kraftigt. Det som påverkar dropparnas verkliga storlek är bl a trycket i sprinklersystemet, typ av dysa och avstånd från dysan. Pumpptrycket påverkar droppstorleken så att ju högre trycket är desto mindre blir dropparna. Valet av dysa påverkar också droppstorleken då olika typer av dysor ger olika flöden även om samma pumpptryck används. Dropparnas storlek varierar också beroende på avståndet från dysan. Generellt gäller att dropparna blir större ju längre bort från dysan de kommer genom att de koagulerar ihop med varandra. Om sprayen å andra sidan påverkas av en brand kommer dropparnas storlek att minska pga avdunstning. Med noggrann mätning går det att bestämma droppstorleksfördelningen från dysan vid olika tryck och på olika avstånd. Husted har gjort droppstorleksmätningar på den dysa som använts i dessa försök och dessa ligger som underlag vid beräkningarna. Dock är inte droppstorleksmätningarna gjorda på samma avstånd från dysan som vattentäthetsmätningarna vilket resulterar i att droppstorleksfördelningen som använts är en extrapolering från Hustedts mätvärden. Känslighetsanalysen får utvisa hur mycket droppstorleken påverkar resultatet.

5.1.2 Utsläckningskoefficienten, K_{ext}

K_{ext} är direkt knutet till dämpningen och är således direkt påverkat av mätutrustningens tillförlitlighet. För att undvika fel i mätningarna har utförliga kalibreringar gjorts för varje laser och detektor. Trots detta fick en del försök göras om då vissa kanaler gav underliga eller rentav inga värden alls. En stor osäkerhet vad gäller K_{ext} är hur väl medelvärdet som använts i beräkningarna speglar hela mätserien. För att göra en känslighetsanalys av detta kommer medelvärden beräknas dels över hela serier och dels över delar av serierna.

5.1.3 Vattens densitet, ρ_{aq}

Även vattnets densitet varierar. Sin högsta densitet har vatten i vätskefas vid 4°C och lägst är densiteten vid 100°C vid normalt tryck. Vid dessa temperaturer är densiteten ca 1000 respektive 960 kg/m³.

5.1.4 Partikelns utsläckningseffektivitet, Q_e

Q_e varierar beroende på droppstorleken eftersom droppar av olika storlek bryter ljuset olika mycket. Är droppstorleken noga uppmätt kan man med hjälp av Mieplot och ekvation [2:4] beräkna Q_e för just denna droppstorlek.

5.1.5 Faktor f_e

Faktorn f_e varierar även den beroende på droppstorleken men också på beroende på vilket avstånd från detektorn som droppen befinner sig på. En känslighetsanalys på denna variabel görs nedan.

5.2 Känslighetsanalys

Känslighetsanalysen syftar till att kontrollera hur resultatet påverkas av variationer hos variablerna i ekvation [2:10].

5.2.1 Utsläckningskoefficienten K_{ext}

Här följer en analys av hur bra medelvärdet på K_{ext} som används i beräkningarna är. Det värde som har använts i beräkningarna är ett medelvärde taget över samtliga 10000 mätvärden.

Kontrollen gick till som följer:

Medelvärden beräknades för varje intervall om 500 mätvärden (1-500, 501-1000, ..., 9501-10000) samt för hela mätserien (1-10000). För att se om det skiljer mellan kanaler och mätavstånd från centrum gjordes beräkningarna för fyra kanaler (47, 51, 55 och 59 cm över brännaren) och på fyra olika avstånd från centrum av konen (0, 12.5, 20 och 40 cm). I Tabell 2 nedan redovisas medelvärdet för mätvärde 1-10000, standardavvikelsen för medelvärdena tagna i intervall om 500 värden och samma standardavvikelse omräknad till procent av medelvärdet.

Tabell 2: Kontroll av medelvärdet.

Höjd: 59 cm				Höjd: 51 cm			
Avstånd	Medelvärde	Standard avvikelse	Std. av. i %	Avstånd	Medelvärde	Standard avvikelse	Std. av. i %
0	0.1841	0.016666	9.05%	0	0.774788	0.024079	3.11%
12.5	0.190429	0.02003	10.52%	12.5	0.746296	0.043908	5.88%
20	0.23487	0.00692	2.95%	20	0.82226	0.006395	0.78%
40	0.234137	0.001445	0.62%	40	0.832539	0.001222	0.15%
Höjd: 55 cm				Höjd: 47 cm			
Avstånd	Medelvärde	Standard avvikelse	Std. av. i %	Avstånd	Medelvärde	Standard avvikelse	Std. av. i %
0	0.316506	0.024813	7.84%	0	0.311794	0.020331	6.52%
12.5	0.35052	0.034782	9.92%	12.5	0.320173	0.023989	7.49%
20	0.408374	0.01278	3.13%	20	0.348127	0.012073	3.47%
40	0.372041	0.00296	0.80%	40	0.380225	0.003904	1.03%

Tabellen visar att skillnaden är stor beroende på avståndet från centrum av konen, ju längre från centrum desto mindre blir avvikelserna. En kontroll av hur stor avvikelsen är i medeltal baserad på värdena i Tabell 2 gav en genomsnittlig standardavvikelse på 4,58% av medelvärdet.

Omräkning från mätvärdena till K_{ext} ger en standardavvikelse på K_{ext} som är 3% men eftersom osäkerheterna i omräkningsmodellen är okända sätts värdet till 10%.

5.2.2 Faktorn f_e 's vinkelberoende

Faktorn f_e påverkas både av vinkeln och av droppstorleken. Vid bestämningen av variabeln L konstaterades att merparten av vattnet fanns inom en radie av 20 till 30 cm från centrum av sprayen. Om avståndet bestäms till 25 cm kommer vinkeln att variera mellan $0,86^\circ$ och $1,73^\circ$.

En kontroll där beräkningar av f_e gjordes för olika vinklar visade att vinkelberoendet hos resultaten från ekvation [2:10] är 3,6 % . (se Tabell 3)

Tabell 3: bestämning av hur f_e :s vinkelberoende påverkar resultatberäkningen gjord för droppdiameter 40 μ m.

Vinkel (°)	f_e
0.86	0.583
1.15	0.562
1.73	0.543
Medelvärde	0.562
Standardavvikelse	0.02
Std. Av. i %	3.6%

Anledningen till att tabellen är gjord för droppdiameter 40 μ m är att detta är troligaste värde i den droppstorleksfördelning som användes för att kontrollera inverkan av d_p på resultatet (se kap 5.2.3)

5.2.3 Övriga variabler i ekvation [2:10]

$$m^m = \frac{2 \cdot d_p \cdot K_{ext} \cdot \rho_{aq}}{3 \cdot Q_e \cdot f_e \cdot L} \quad [2:10]$$

Känslighetsanalysen genomfördes med hjälp av programvaran @RISK från Palisade Software. @RISK är en programvara som gör det möjligt att lägga in sannolikhetsfördelningar i Microsoft Excel och studera hur variationer i variablerna påverkar resultaten.

Första delen av känslighetsanalysen gick ut på att försöka bestämma vilka värden de olika variablerna kunde tänkas anta och vilken sannolikhetsfördelning som stämde bäst med dessa värden. En tabell konstruerades där Q_e och f_e (för vinkeln 1,15°) anges för olika värden på d_p (Tabell 4). Med hjälp av @RISK slumpades värden på d_p fram enligt en triangelfördelning (se motivering till denna nedan). Det värde som slumpas fram används på två sätt. Dels sätts det in direkt i ekvation [2.10], och dels avrundas det till närmsta tiotals mikrometer. Värden på Q_e och f_e för rätt droppstorlek hämtas ur Tabell 4 och sätts in i samma ekvation.

Tabell 4: Värden på Q_e och f_e för olika värden på d_p .

Diameter (μ m)	Q_e	f_e 1,15°
20	2,155753704	0,69126615
30	2,11569971	0,57784019
40	2,096468488	0,56173847
50	2,088010994	0,55910044
60	2,067033665	0,54676271
70	2,064596899	0,54146372

Den triangelfördelning som använts för att slumpa fram värden på d_p har tagits fram genom att anpassa en fördelning mot den droppstorleksfördelning som uppmätts av Husted (Diagram 7). Denna ger följande värden för triangelfördelningen; min: 19 μ m, troligast: 41,26 μ m, max: 62 μ m.

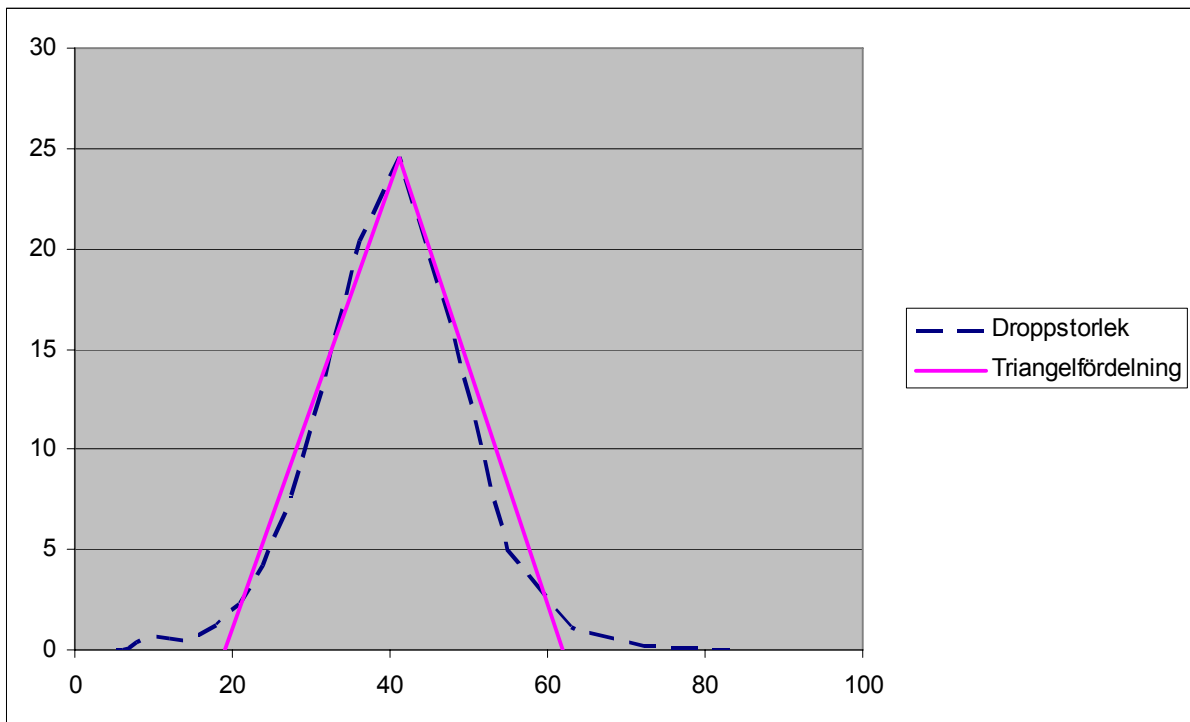


Diagram 7: Droppstorleksfördelning från Husted's mätning tillsammans med den triangelfördelning som använts för känslighetsanalysen.

De värden som används för känslighetsanalysen är hämtade från försök som gjorts utan flamma. I dessa försök är värdet på L som nämnts i avsnitt 4.4.1 ca 0,4 meter. För att se hur värdet på L påverkar resultatet har det i @RISK simulerats som en likformig fördelning mellan 0,3 och 0,5 meter.

ρ_{aq} kan variera mellan 1000 kg/m^3 vid $4 \text{ }^\circ\text{C}$ till 960 kg/m^3 vid $100 \text{ }^\circ\text{C}$. För att undersöka påverkan på resultatet har en likformig fördelning mellan dessa värden använts i @RISK.

Simuleringen i @RISK kördes med 1000 itereringar, dvs datorm fick slumpa 1000 värden baserat på fördelningarna, och urvalet gjordes enligt Latin Hypercube-modellen. I @RISK finns verktyg för att göra känslighetsanalyser med både regression och korrelation. Dessa illustreras i tornodidiagrammen nedan (Diagram 8 och Diagram 9). Diagram 8 visar resultatet av regressionsanalysen och visar om det finns linjära samband mellan variablerna och resultaten och vilken variabel som påverkar resultatet mest. Diagram 9 visar resultatet av korrelationsanalysen vilket i detta fall endast fungerar som en verifikation av regressionsanalysen. Om resultaten av regressionsanalysen haft låga värden (nära noll) på alla variabler hade korrelationsanalysen varit den vägande men i detta fall är ekvationen som skall kontrolleras relativt enkel och alla samband är mer eller mindre linjära vilket gör att regressionsanalysen räcker.

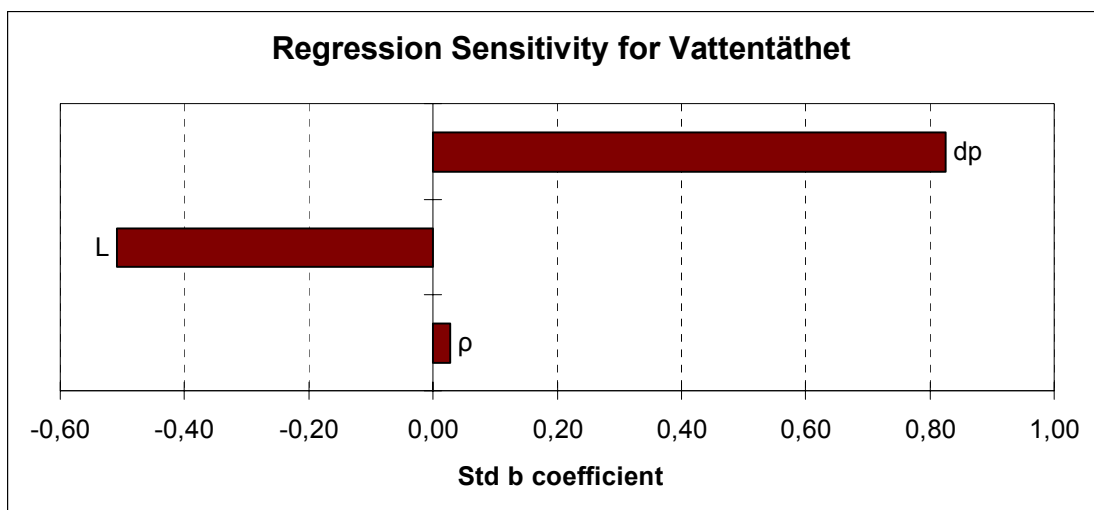


Diagram 8: Regressionsanalys.

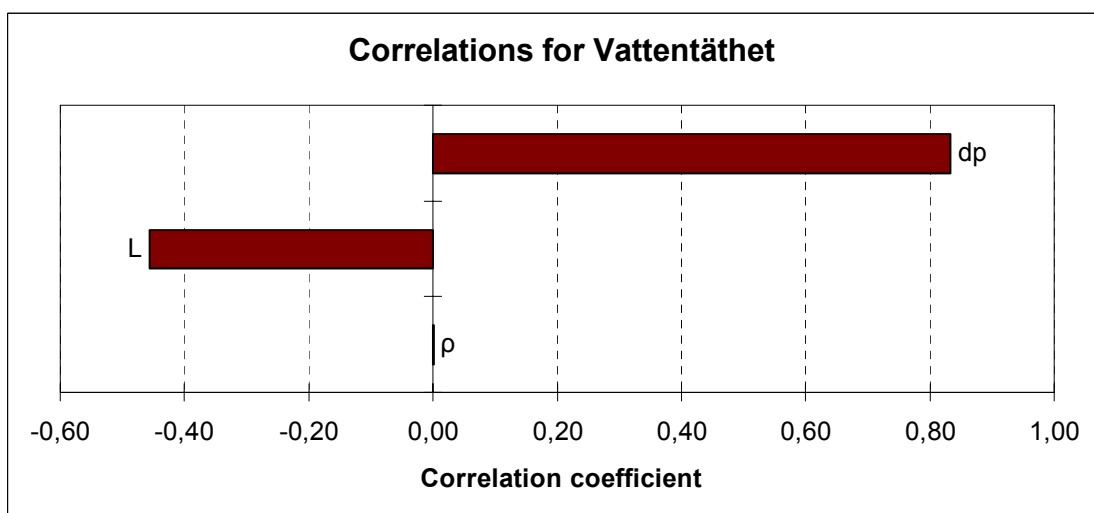


Diagram 9: Korrelationsanalys.

@RISK användes också för att kontrollera de enskilda variabelernas påverkan på resultatet. Detta gjordes genom att en variabel fick variera medan de övriga hölls konstanta (Q_e och f_e valdes beroende på dp som tidigare; var dp konstant, var också dessa konstanta och tvärtom). Resultatet från denna analys blev som följer:

Tabell 5: Variablernas medelvärden och standard avvikelser.

Variabel	Medelvärde	Standardavvikelse (σ)
dp	40	8,8
L	0,4	0,058
ρ_{aq}	980	11,547
K_{ext}	4,2	0,42
f_e	0,562	0,02

För att kunna studera hur variationerna i variablerna påverkar resultatet måste de olika variablerna värderas mot varandra. Detta görs med ekvation [5.1]. Q_e antas i detta fallet vara en konstant med värdet 2,097.

$$(\sigma_y)^2 = \sum_x \left(\left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \cdot \sigma_x^2 \right) \quad [5.1]$$

om ekvation [5.1] används på ekvation [2.10] erhålls följande:

$$(\sigma_{m''})^2 = \left(\left(\frac{\partial m''}{\partial d_p} \right)^2 \cdot \sigma_{d_p}^2 \right) + \left(\left(\frac{\partial m''}{\partial K_{ext}} \right)^2 \cdot \sigma_{K_{ext}}^2 \right) + \left(\left(\frac{\partial m''}{\partial \rho_{aq}} \right)^2 \cdot \sigma_{\rho_{aq}}^2 \right) + \left(\left(\frac{\partial m''}{\partial f_e} \right)^2 \cdot \sigma_{f_e}^2 \right) + \left(\left(\frac{\partial m''}{\partial L} \right)^2 \cdot \sigma_L^2 \right)$$

uträkning av derivatorna ger följande värden

$$\frac{\partial m''}{\partial d_p} = \frac{2 \cdot K_{ext} \cdot \rho_{aq}}{3 \cdot Q_e \cdot f_e \cdot L} = \frac{2 \cdot 4,2 \cdot 980}{3 \cdot 2,097 \cdot 0,562 \cdot 0,4} \approx 5820,889$$

$$\frac{\partial m''}{\partial K_{ext}} = \frac{2 \cdot d_p \cdot \rho_{aq}}{3 \cdot Q_e \cdot f_e \cdot L} = \frac{2 \cdot 0,00004 \cdot 980}{3 \cdot 2,097 \cdot 0,562 \cdot 0,4} \approx 0,055$$

$$\frac{\partial m''}{\partial \rho_{aq}} = \frac{2 \cdot d_p \cdot K_{ext}}{3 \cdot Q_e \cdot f_e \cdot L} = \frac{2 \cdot 0,00004 \cdot 4,2}{3 \cdot 2,097 \cdot 0,562 \cdot 0,4} \approx 0,00024$$

$$\frac{\partial m''}{\partial f_e} = \frac{2 \cdot d_p \cdot K_{ext} \cdot \rho_{aq}}{3 \cdot Q_e \cdot L} = \frac{2 \cdot 0,00004 \cdot 4,2 \cdot 980}{3 \cdot 2,097 \cdot 0,4} \approx 0,131$$

$$\frac{\partial m''}{\partial L} = \frac{2 \cdot d_p \cdot K_{ext} \cdot \rho_{aq}}{3 \cdot Q_e \cdot f_e} = \frac{2 \cdot 0,00004 \cdot 4,2 \cdot 980}{3 \cdot 2,097 \cdot 0,562} \approx 0,093$$

insättning av värdena på derivatorna samt värdena på standardavvikelserna från tabell 5 ger ett värde på standardavvikelsen för vattentätheten på

$$\sigma_{m''} \approx 0,057$$

Medelvärde på vattentätheten fås genom att sätta in värdena i tabell 5 i ekvation [2.10]

$$m'' = \frac{2 \cdot 0,00004 \cdot 4,2 \cdot 980}{3 \cdot 2,097 \cdot 0,562 \cdot 0,4} \approx 0,233$$

detta innebär att osäkerheten hos de uträknade vattentäthetsvärdena är $\pm 24,5\%$.

6 Diskussion

6.1 Resultaten

Vad säger då allt detta? Målsättningen med denna rapport har varit att visa att mätmetoden fungerar för att mäta vattentäthet i fullskaliga försök med vattendimma. Har detta då lyckats? De värden som erhållits från metoden ligger i centrum av sprayen mellan 0,1 och 0,2 kg/m³ vilket enligt andra tester är släckande koncentrationer (SFPE 2002). Ett återkommande problem under försöken har varit att släckning skett med jämna mellanrum vilket tyder på att vattenkoncentrationerna legat nära släckgränsen.

6.2 Uppställningen

Så här i efterhand finns en del att säga om den uppställning som använts. Uppställningen som sådan har fungerat bra men om nya försök ska genomföras finns det vissa saker som kan förbättras. Mätningarna som gjorts inom detta arbete gjordes i vertikalled, dvs. i varje mätserie gjordes mätningar på olika höjder och sedan flyttades uppställningen i horisontalled inför nästa mätning. Därefter fick mätvärdena sammanställas till filer som innehöll värdena för respektive höjd innan de kunde stoppas in i beräkningsmodellerna i Matlab.

I ett av diagrammen i Bilaga IV (Diagram 19) finns ett extremt värde på vattentätheten som antas bero på att en av fotocellerna inte har alstrat någon spänning under åtminstone en stor del av det försöket. Under förberedelserna inför försöken har andra fotoceller också gått sönder på olika sätt. Vissa av fotocellerna har även haft spruckna glas. Vid nya försök rekommenderas att man använder nya och fräscha fotoceller för att undvika sådana problem.

6.3 Känslighetsanalysen

Känslighetsanalysen visar att eventuell variation i vattendensiteten endast har en liten påverkan på resultaten vilket innebär att den kan hållas mer eller mindre konstant, eller åtminstone att man inte behöver ägna den särskilt stor uppmärksamhet. De variabler som behöver läggas krut på att bestämma bättre och exaktare värden på är droppstorleken d_p , sprayens tjocklek L och vinkel som påverkar f_e . De vinklar som användes i känslighetsanalysen är väldigt grovt tilltagna. De är den minsta och den största möjliga vinkeln som kan uppkomma i uppställningen. Därmed inte sagt att det är troligt att det finns vattendroppar inom hela detta område. Att vinkeln skulle påverka resultatet med hela 11% bör därför vara ett konservativt värde. För den som reagerat på att olika droppstorleksfördelningar använts i beräkningarna och känslighetsanalysen finns det en förklaring. Fördelningen som används i beräkningen är extrapolerad från mätvärden för att få en fördelning som är mer trolig för det avstånd som mätningen sker på då uppmätta droppstorleksfördelningar saknades för dessa nivåer. Fördelningen som används i känslighetsanalysen är baserad på en uppmätt droppstorleksfördelning och tanken är att det som är intressant här är hur mycket resultaten varierar och inte de exakta värdena. Här representerar triangelfördelningen som använts en verklig fluktuation.

6.4 Vattentäthet nära brännaren

Den droppstorleksfördelning som används för beräkningarna inom detta arbete baseras på mätningar av droppstorleksfördelningen i en spray som inte påverkas av någon flamma. I flaman kan man anta att en del av vattnet kommer att förångas, vilket gör att den genomsnittliga droppstorleken minskar. Detta har inte tagits någon hänsyn till i detta arbete och därför blir de värden på vattentätheten som redovisas mer osäkra ju större avståndet från sprinklerdysan är.

6.5 Multipelspridning

Vid en vattentäthet på $0,2 \text{ kg/m}^3$ och en medeldroppdiameter på $50 \text{ }\mu\text{m}$ upptar vattnet ca 0,02 % av rumsvolymen. Detta anses vara en så liten andel att multipelspridning kan försummas.

7 Slutsats

7.1 Mätmetodens användbarhet

Författarnas slutsats baseras på en kombination av tre saker:

1. Tidigare tester med cup burner har visat att släckning av en flamma sker vid en vattentäthet på 0,1-0,2 kg/m³.
2. Vid försöken har flammen från brännaren då och då släckts, vilket orsakat att försök måste göras om. Detta tyder på att vattentätheten under försöken är nära släckgränsen.
3. De mätvärden som erhållits som resultat av försöken är i sprayens centrum ca 0,1-0,2 kg/m³.

Författarnas slutsats är således att metoden och de mätvärden som presenteras i rapporten är användbara.

7.2 Förbättringar inför nya försök

Om nya försök att mäta vattentäthet enligt den metod som presenteras i denna rapport planeras föreslår författarna följande förändringar gentemot de försök som presenteras här:

- Fler och tätare placerade lasrar.
- Mätningar av droppstorleksfördelning gjorda på samma höjder som vattentäthetsmätningarna skall göras på.

Referenslista

Andersson P., Arvidson M., Holmstedt G., ”Small scale experiments and theoretical aspects of flame extinguishment with water mist” LUTVDG/TVBB-3080 Lund 1996

Andersson P., ”*Evaluation and Mitigation of Industrial Fire Hazards*”, Institutionen för Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet, LUTVDG/TVBB-1015, Lund 1997

Arvidsson M., Hertzberg T., ”*Släcksystem med Vattendimma - en kunskapssammanställning*”, Brandforsk projekt 509-991, Sveriges Provnings och forskningsinstitut, SP Rapport 2001:26, ISBN 91-7848-870-2, ISSN 0284-5172, Borås 2001

Hinds W.C., ”*Aerosol Technology. Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*”, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-08726-2, New York 1982

Hahne A., Hertzberg T., Holmstedt G. och Husted B., Josefsson C., ”*Vattendimma: Teori, fysik, simulering* Brandforsk projekt 514-021”, SP Rapport 2004:15, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, ISBN 91-7848-988-1, ISSN 0284-5172, Borås 2004

NFPA 750, ”*NFPA 750: Standard on Water Mist Fire Protection Systems*”, National Fire Protection Agency, Quincy, MA, USA

Shepp L. A., Logan B. F., ”*The Fournier Reconstruction of a Head Section*”, Bell laboratories, Murray Hill, New Jersey, Published in: IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-21, June 1974

SFPE, Mawhinney J. R. and Back G. G., ”*Water Mist Fire Suppression Systems*”, SFPE Handbok, 3:rd edition, Section 4, Chapter 14, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, USA, ISBN: 087765-451-4, 2002

Särdqvist S., ”*Demand for Extinguishing Media in Manual Fire Fighting*”, Institutionen för Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet, LUTVDG/TVBB-1021, Lund 2000

Internetkällor:

IMO, International Maritime Organisation, <http://www.imo.org>, 2005-10-17

Laven P., <http://www.philiplaven.com> , 2005-10-19

Appendix

Bilaga I – Mjukvara

Denna bilaga innehåller korta beskrivningar av den programvara som har använts under detta arbete.

1.1 Implog2000

Implog2000 är en programvara för insamling av mätdata. Programmet loggar mätdata i form av spänning, temperatur mm. En stor fördel med Implog2000 med tillhörande hårdvara är antalet mätkanaler som kan anslutas. Varje insamlingspod har tjugo ingångar men det går också att seriekoppla två pods så att hela 39 kanaler kan anslutas till en och samma mjukvara. Detta ger stora möjligheter att kunna göra mätningar av många olika variabler och i flera punkter samtidigt.

1.2 Picolog

Picolog är en programvara för datainsamling framtagen av Pico Technology Limited. Programvaran kan användas ihop med flera olika typer av datainsamlade hårdvara. En fördel med Picos hårdvaror är att inget speciellt datakort behöver installeras i datorn utan befintliga anslutningsportar används. Hårdvaran finns både i parallellportsutförande och med USB-anslutning. Den hårdvaruenhet som användes vid detta arbete har betäckningen: ADC-11 för parallellport. Till denna kopplas en terminalenhet till vilken 11 mätkanaler kan anslutas. Programvaran skall kunna utföra loggning av mätdata på två mätenheter simultant så att 22 kanaler skall kunna användas, detta kräver dock dubbla ingångar i dator och loggningshastigheten blir begränsad.

1.3 Matlab

Matlab är ett kommersiellt program framtaget av företaget The MathWorks, och är ett beräkningsprogram i vilket komplicerade beräkningsarbeten kan göras. Inom detta arbete användes Matlab för att utföra Shepp-Logan beräkningarna samt integrering av mätdata från programvaran Mieplot.

1.4 Mieplot

Program av sharewaretyp fram taget av Philip Laven. Programmet räknar ut hur stor del av det ljus som faller in mot en droppe som sprids i olika riktningar för olika typer av spridning och storlek på droppar. Det går också att välja omgivande medium och temperaturer samt våglängd och typ av ljuskälla.

En bra egenskap är att det går att låta programmet räkna på en fördelning av droppstorlekar och inte bara en specifik storlek.

1.5 @RISK

@RISK är en del av programvarupaketet Palisade Desition tools framtaget av Palisade Software. Programet gör det möjligt att lägga in sannolikhetsfördelningar i Microsoft Excel och utföra analyser på hur variationer i indata påverkar resultatet. @RISK används som ett verktyg för att identifiera vilka variabler som har störst inverkan på resultatet så att fokus kan läggas på att minska variationen hos dessa och inte på de variabler som har liten eller ingen påverkan på resultatet.

1.6 Shepp-Logan

För att skapa en tredimensionell bild av den tvådimensionella mätdata måste mätvärdena omarbetas. Shepp-Loganmodellen är ett sätt att omräkna linjär mätdata till en cirkulär yta. De

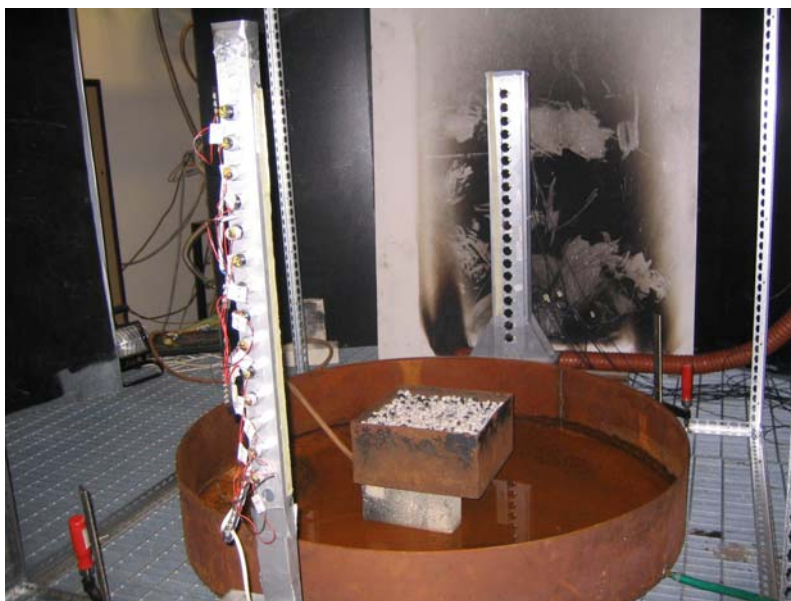
förutsättningar som finns för att Shepp-Loganmodellen skall kunna användas är att mätningarna gjorts ut till ett nollläge och att strukturen på mätområdet kan antas vara någorlunda cirkulär. Båda dessa krav uppfylls i använd försöksuppställning. Shepp-Logans modell används bland annat inom datortomografi. Datortomografi görs ju från utsidan och de mätdata som erhålls måste därför omformas för att kunna ge en bild av hur det faktiskt ser ut inne i kroppen. Många av de system som är i bruk i dag använder sig av Shepp-Logans modell för att göra denna omräkning

Bilaga II - Försöksuppställningen

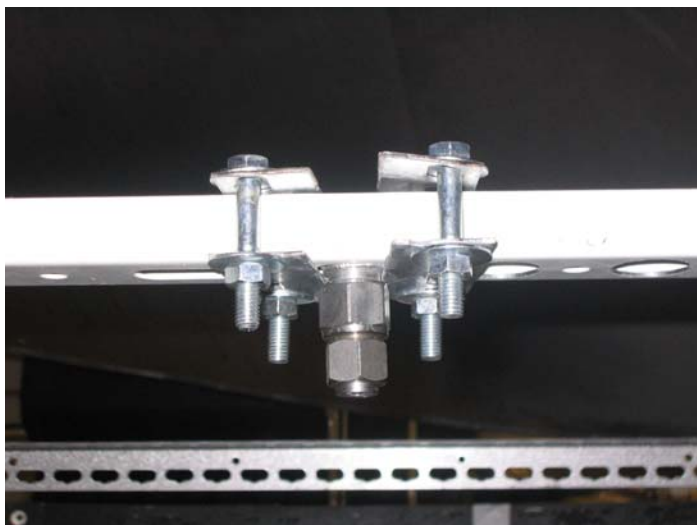
Här visas dels specifikationer för en del av den utrustning som använts och dels foton som visar uppställningen. Dessa foton samt några ytterligare finns också på den CD-ROM som tillhör rapporten.

Tabell 6: Specifikationer för detaljer i försöksuppställningen.

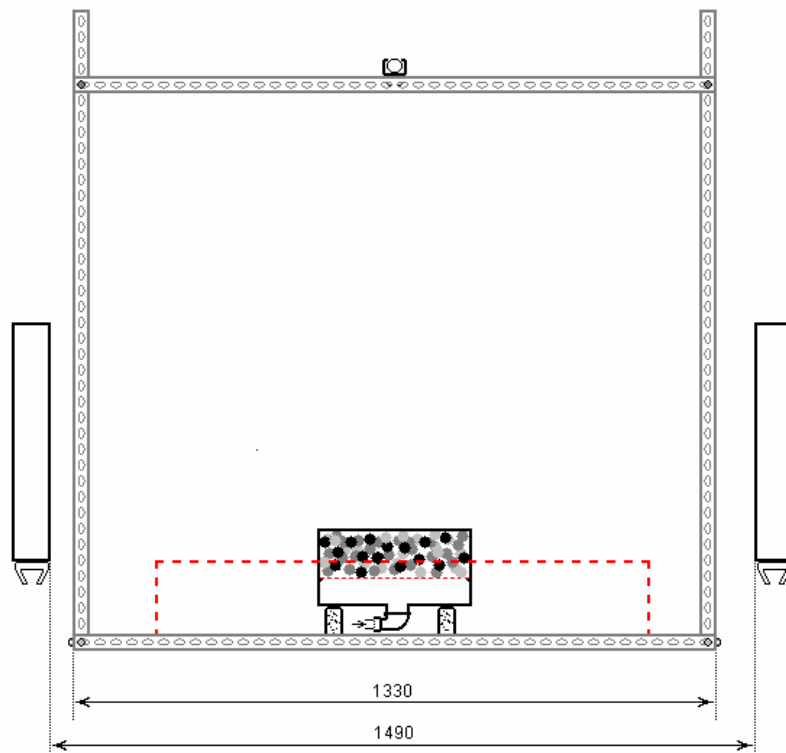
Sprinklerhuvud	Danfoss 1910; 0,42 l/min vid 100 bar
Pump	Danfoss Power Pack pph 6,3 med ventil VPH15E
Tryckslang	12 mm
Dioder	Hamamatsu's GaAsP extended red photo diodes
Laser	Laserdiod 670nm 5mW



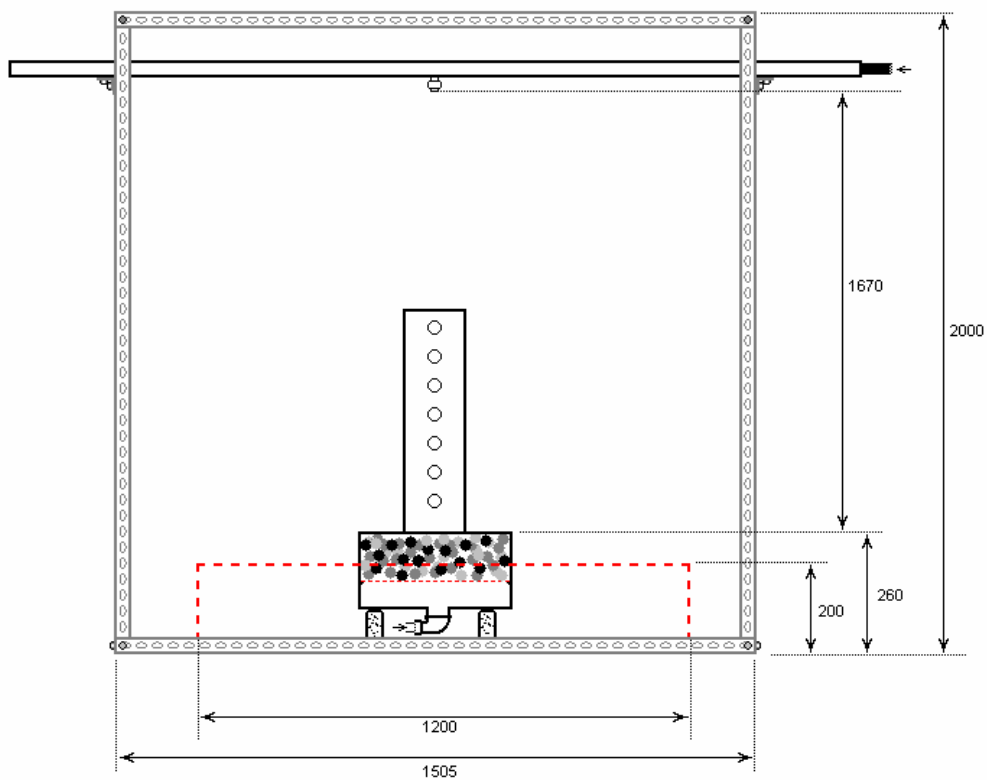
Figur 9: De delar som syns i denna bild är brännaren, karet som används för att samla upp vatten, pelaren där laserdioderna är monterade (närmast) och pelaren där fotocellerna är monterade.



Figur 10: Dysans montering.



Figur 11: Ritning över uppställningen med mått angivna i mm.



Figur 12: Ritning över uppställningen med mått angivna i mm.

Bilaga III – Indata till Matlab

Nedan visas hur indatafilerna till Matlabberäkningarna ser ut.

Förklaring:

Denna indatafil är från försöksserie 1 och är för kanal 4 dvs. den fjärde kanalen räknar nedifrån.

17 = antal rader med mätdata i indata filen

Vänsterkolumnen innehåller avstånden för mätningarna i sidled i mm där nollan motsvarar centrum.

Högerkolumnen innehåller medeldämpningen över tiden för varje mätavstånd i sidled.

17	
-400	0.99916323
-350	0.990881197
-300	0.98254213
-250	0.969743658
-200	0.966437127
-150	0.966745534
-100	0.734460868
-50	0.953543331
0	0.898543076
50	0.953543331
100	0.734460868
150	0.966745534
200	0.966437127
250	0.969743658
300	0.98254213
350	0.990881197
400	0.99916323

Samtliga indatafiler finns i Bilaga V.

Bilaga IV – Resultat

IV.1 Vattentäthetsdiagram för försöken med endast sprinkler

I det diagram som visar vattentätheten 1,28 m från dysan visas en mycket hög vattentäthet ca 10 cm från sprayens centrum. Detta antas bero på att fotocellen inte har gett någon signal i den mätningen.

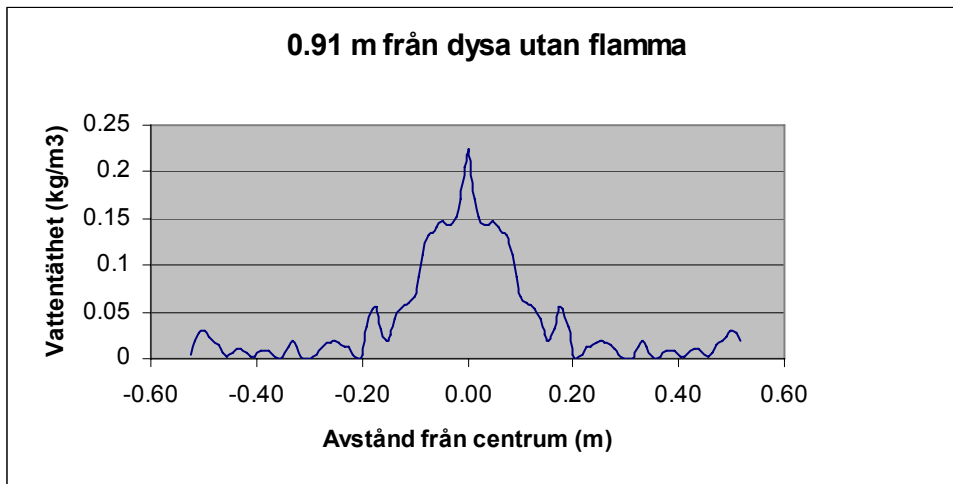


Diagram 10

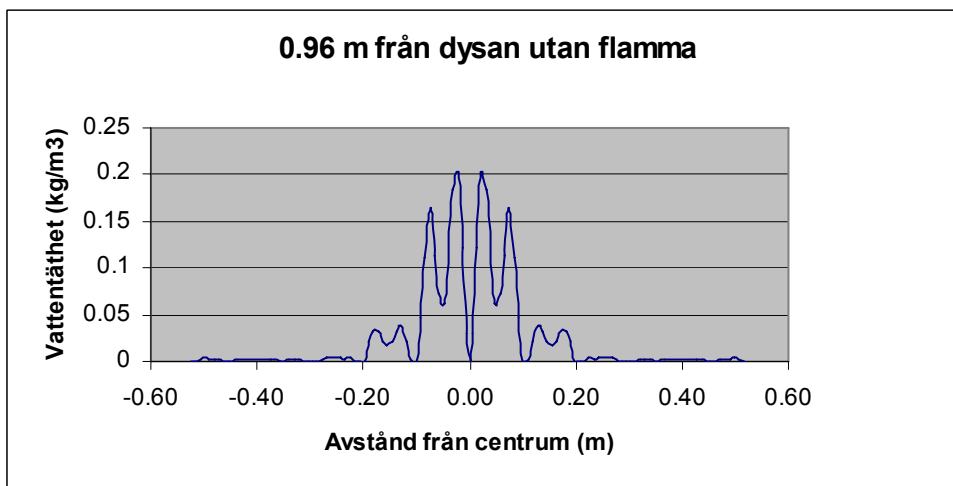


Diagram 11

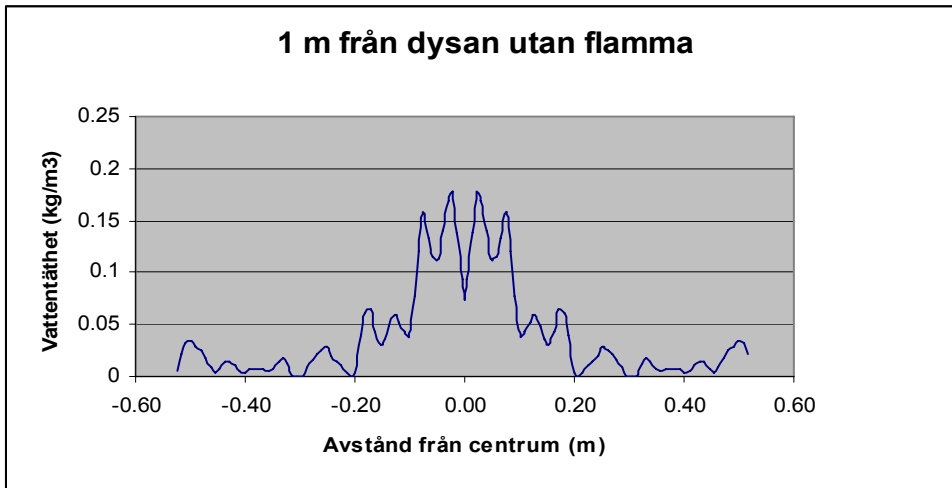


Diagram 12

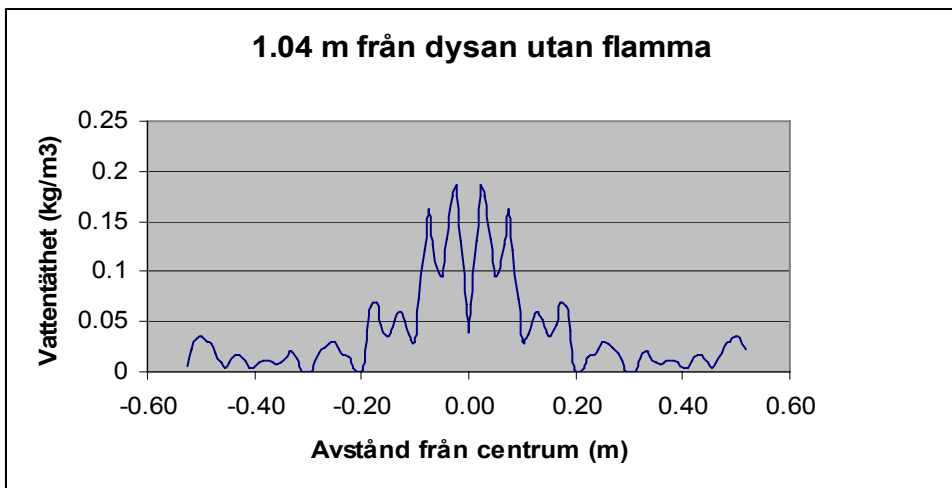


Diagram 13

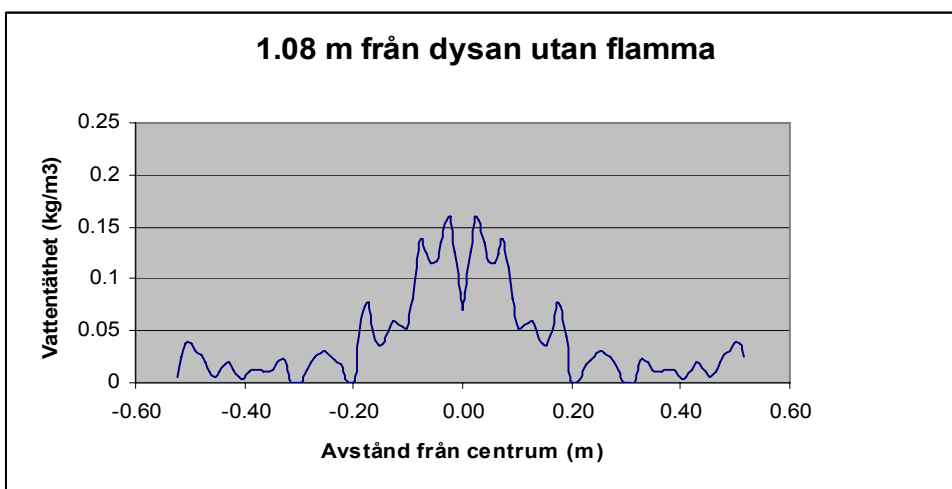


Diagram 14

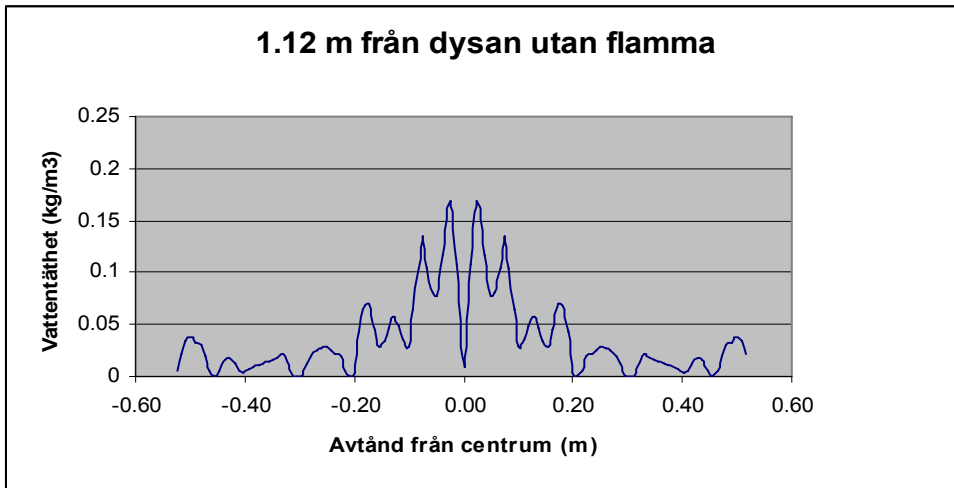


Diagram 15

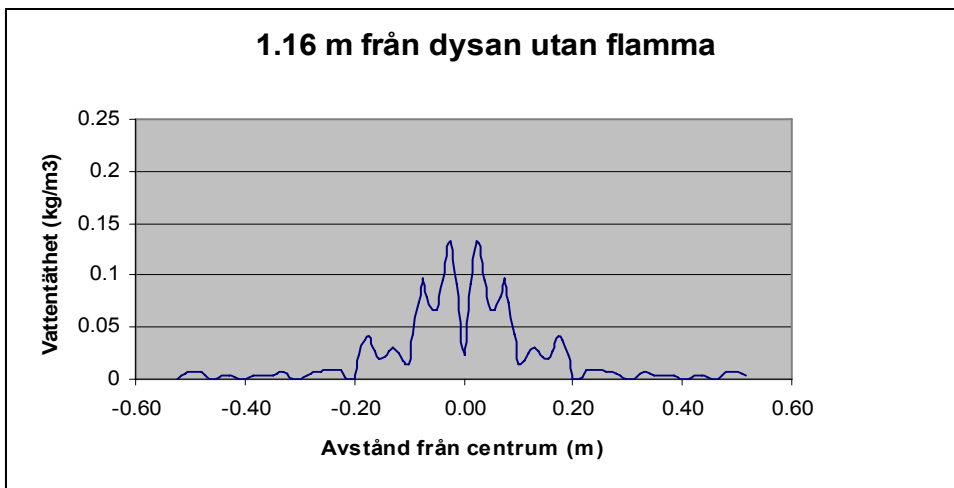


Diagram 16

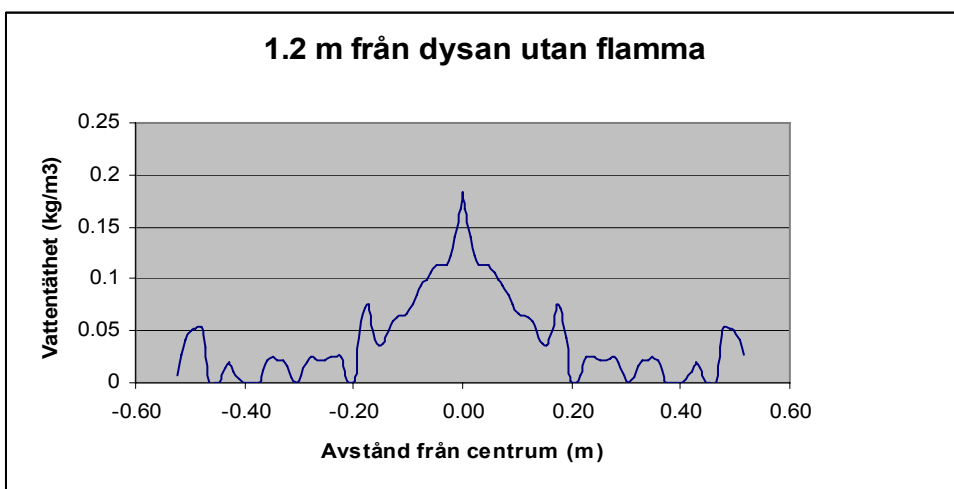


Diagram 17

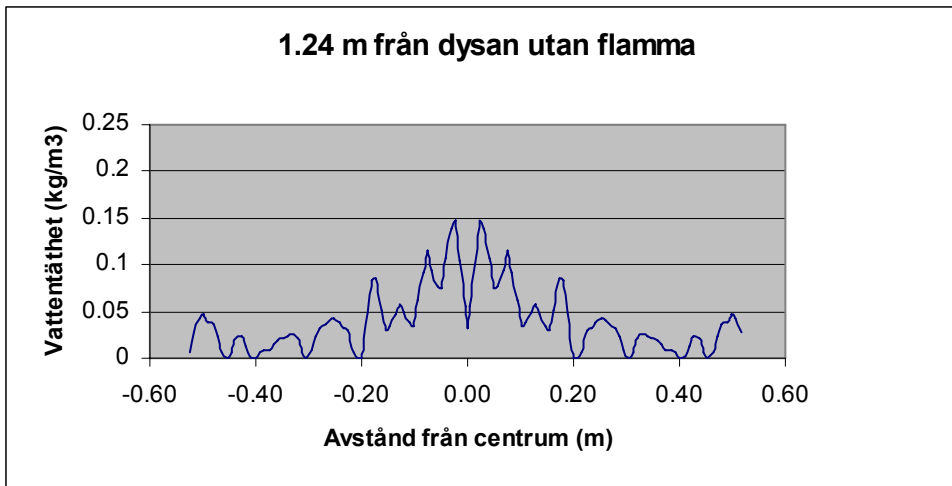


Diagram 18

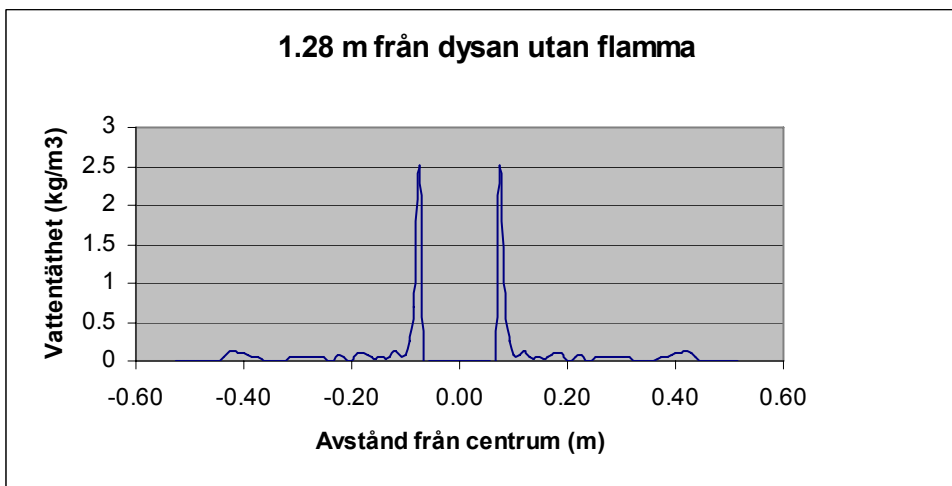


Diagram 19

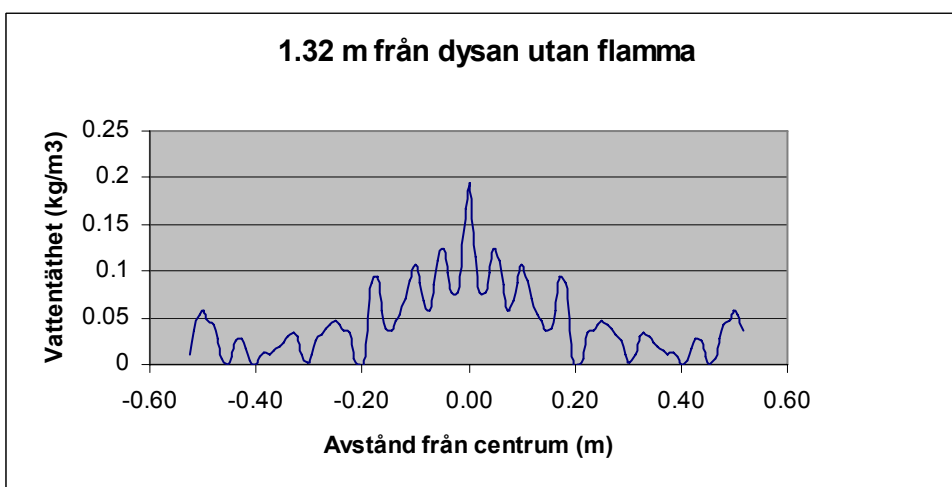


Diagram 20

IV.2 Vattentäthetsdiagram för försöken med både sprinkler och flamma

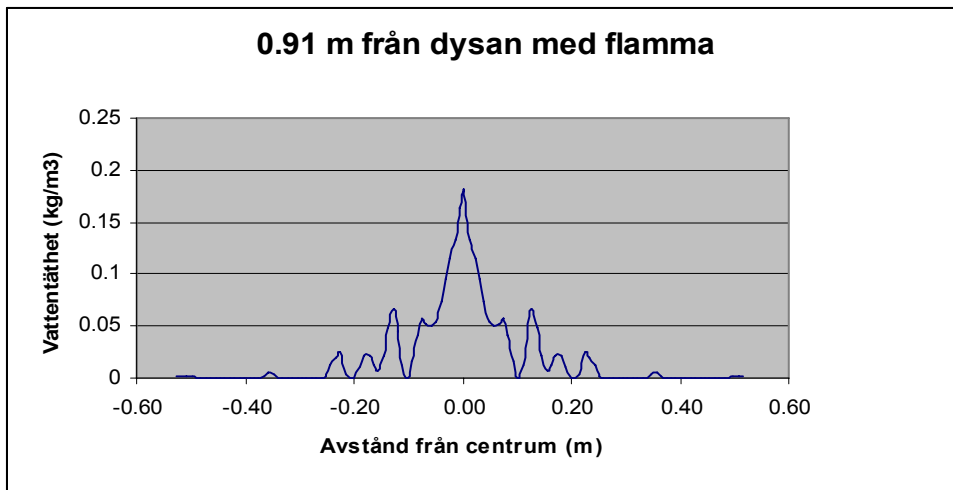


Diagram 21

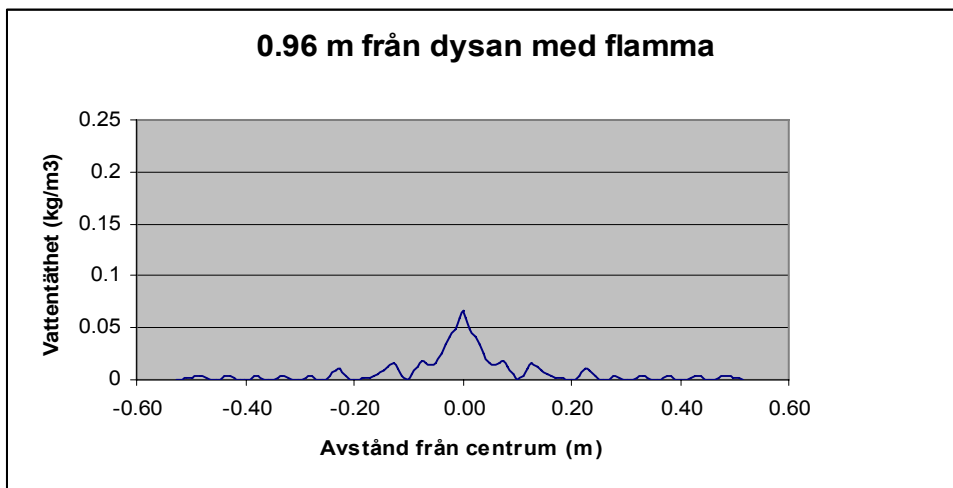


Diagram 22

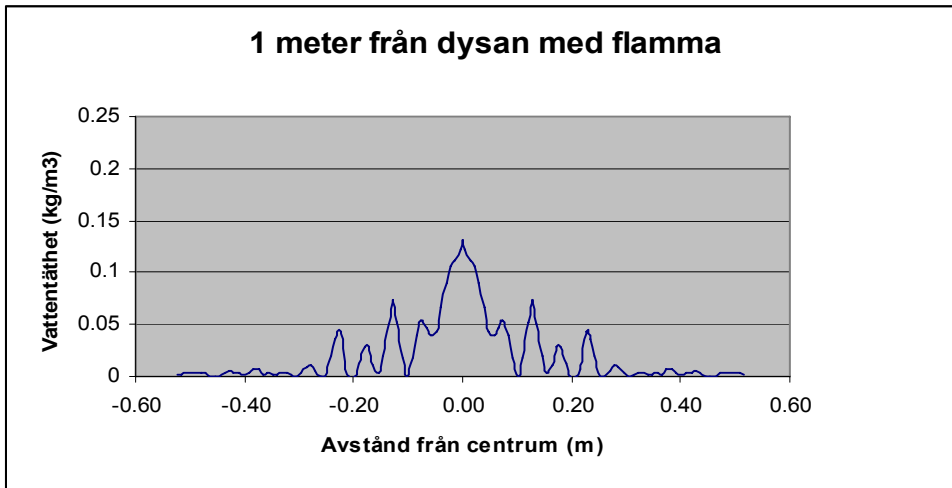


Diagram 23

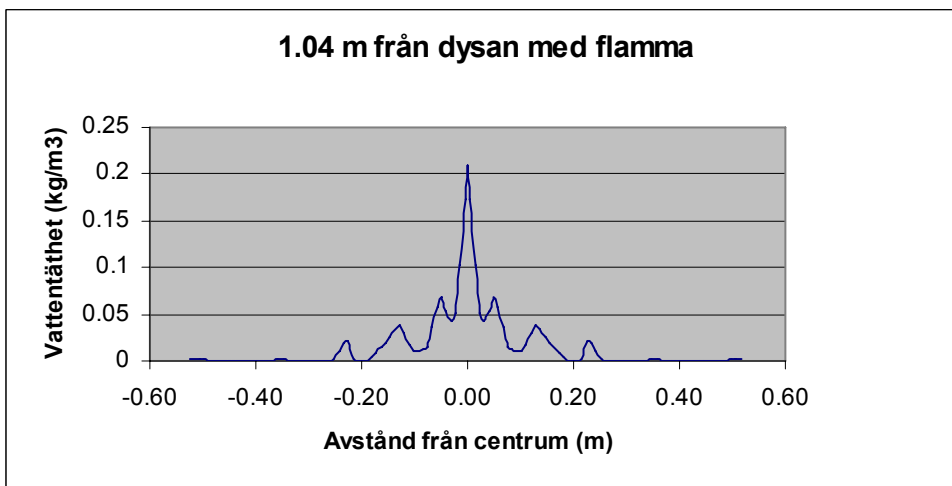


Diagram 24

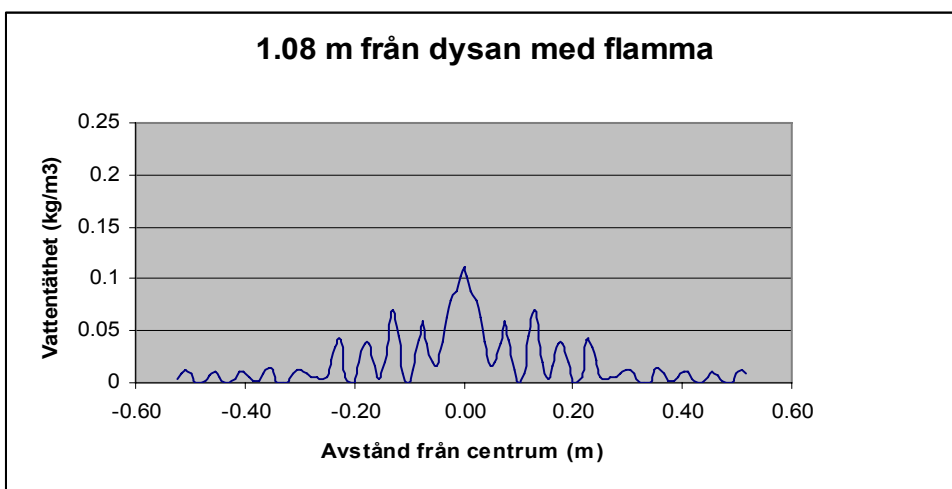


Diagram 25

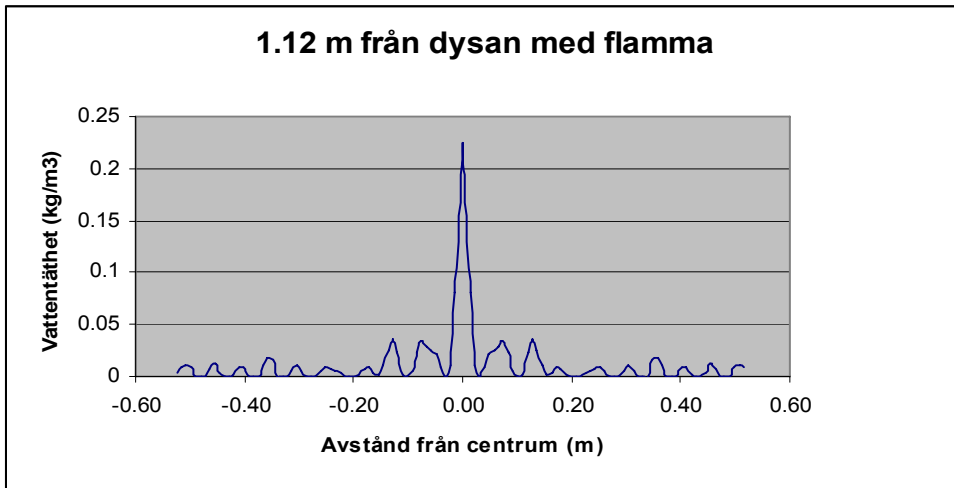


Diagram 26

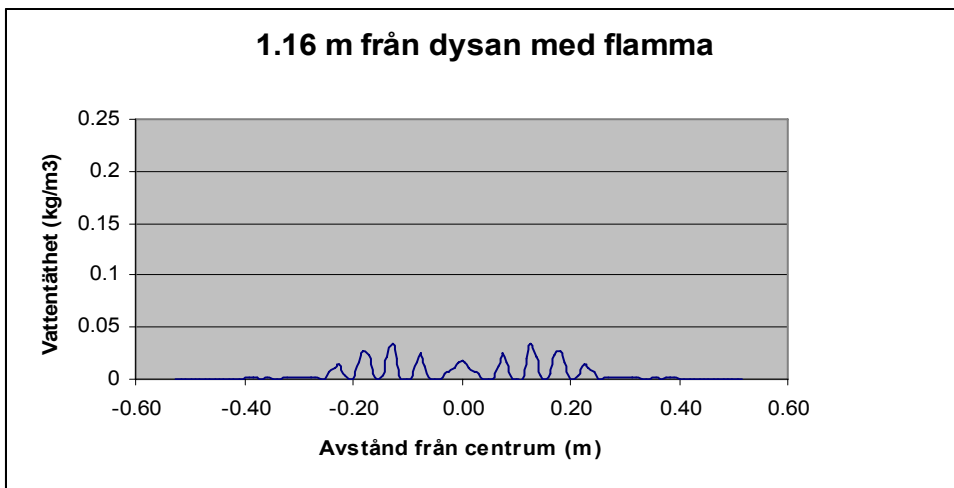


Diagram 27

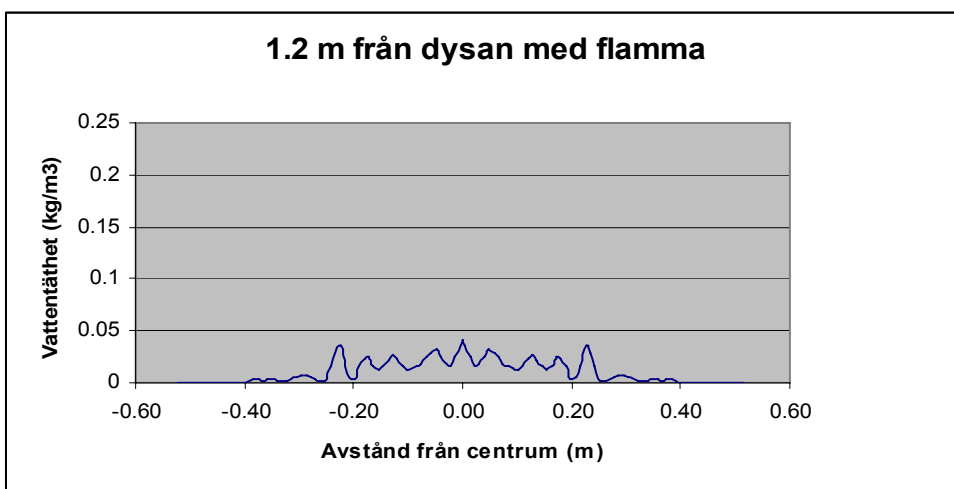


Diagram 28

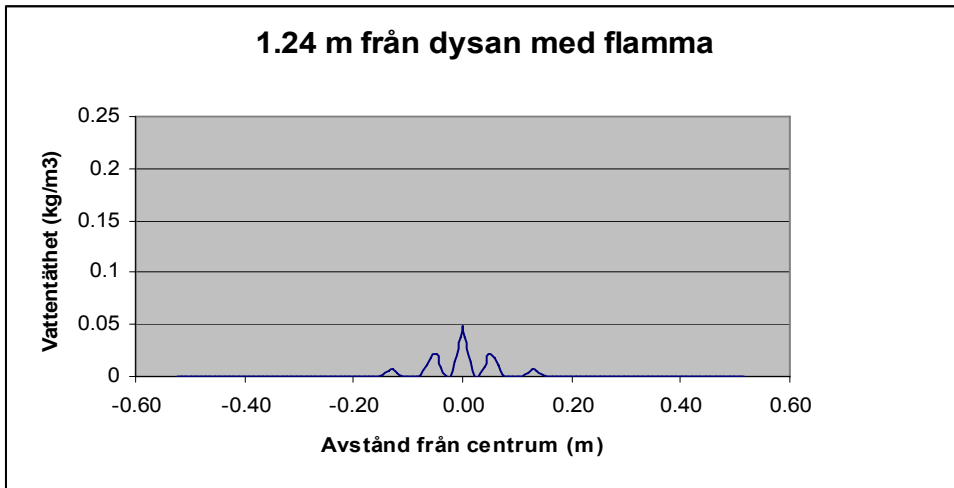


Diagram 29

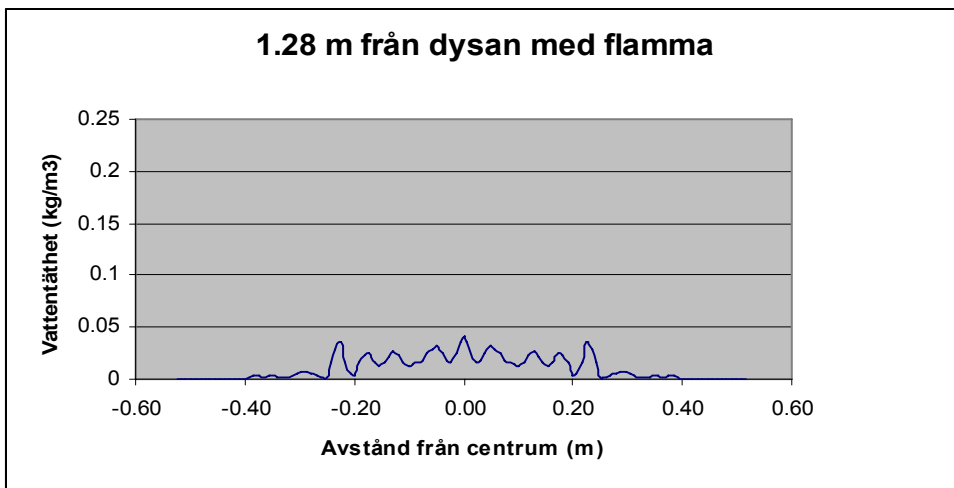


Diagram 30

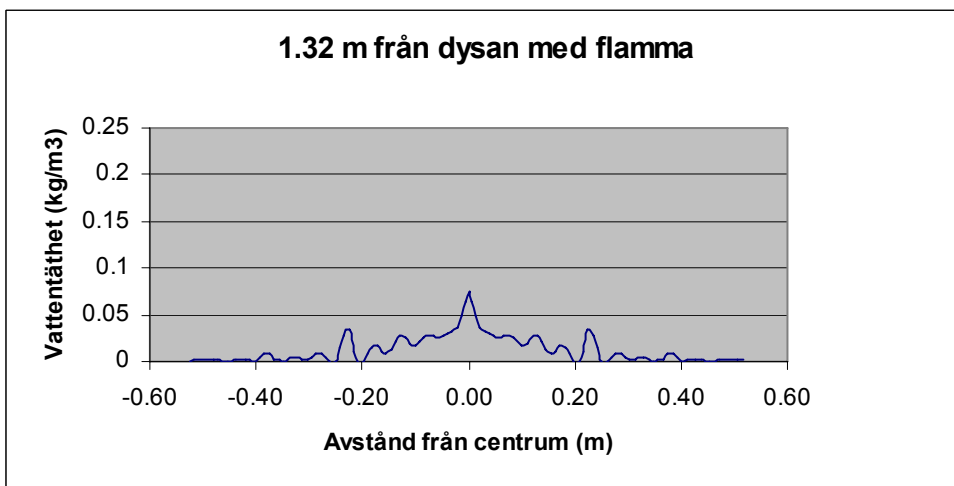


Diagram 31

Bilaga VI – CD-ROM

Om CD-skivan saknas eller rapporten är nedladdad från internet, kontakta institutionen för brandteknik vid Lunds Universitet.

If the CD-ROM is missing, or if the report is downloaded from the Internet, please contact the department for fire safety engineering at Lund University