

BRANDSCHUTZ - FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen,
die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.

Teil 9: Simulation der Wasserbeaufschlagung
eines Sprinklers

83

ARBEITSGEMEINSCHAFT DER INNENMINISTERIEN DER BUNDESLÄNDER
ARBEITSKREIS V - UNTERAUSSCHUSS "FEUERWEHRANGELEGENHEITEN"

Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer
Arbeitskreis V - Unterausschuß "Feuerwehrangelegenheiten"

Forschungsbericht Nr. 83

Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen,
die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 9: Simulation der Wasserbeaufschlagung
eines Sprinklers.

von
Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik
an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Dezember 1992

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
FORMELZEICHEN	1
1. EINLEITUNG	3
2. ALLGEMEINE BESCHREIBUNG DES PROBLEMS	5
3. RANDBEDINGUNGEN UND ANNAHMEN FÜR DIE BERECHNUNGEN	7
3.1 ERGEBNISSE DER TROPFENGRÖSSEN-ANALYSE MIT EINEM PHASEN/DOPPLER-TEILCHENANALYSATOR	7
3.2 ANNAHMEN FÜR DIE BERECHNUNGEN	12
4. VERGLEICH DER MESSWERTE MIT DEN ERGEBNISSEN DER NUMERISCHEN SIMULATION DER WASSERBEAUFSCHLAGUNG BEI VERSCHIEDENEN SPRINKLERN	14
4.1 SPRINKLER: TYP C	15
4.2 SPRINKLER: TYP B	15
4.3 SPRINKLER: TYP F	16
4.4 SPRINKLER: TYP E	16
5. AUSBLICK	18
6. ZUSAMMENFASSUNG	19
7. LITERATURVERZEICHNIS	21
8. BILDER	27

FORMELZEICHEN

$\Delta \gamma_{Tr,0}$	$\gamma_{Tr,0,au} - \gamma_{Tr,0,in}$
$\gamma_{Tr,0}$	Einsprühwinkel
$\gamma_{Tr,0,au}$	Äußerer Winkel des Sprühkegels
$\gamma_{Tr,0,in}$	Innerer Winkel des Sprühkegels
D_{Ti}	Mittlerer Tropfendurchmesser der Fraktion i in mm
$D_{A50\%}$	Anzahlbezogener Halbwertstropfendurchmesser
$D_{V50\%}$	Volumenbezogener Halbwertstropfendurchmesser
D_{10}	Arithmetischer Mittelwert der Tropfendurchmesser
D_{32}	Sauter-Durchmesser
k	Anzahl der Durchmesserfraktionen
k_{Flug}	Unterteilung des Sprühkegels
$k_{Umf.}$	Unterteilung des Sprühkegelumfanges
k_{vert}	Abminderungsfaktor für die vertikale Einsprühgeschwindigkeit der Tropfen
n_i	Anzahl der Tropfen in der Fraktion i
S	Symbol für den Sprinkler
T_{Gx}	Gastemperatur in horizontaler Richtung
T_{Gz}	Gastemperatur in vertikaler Richtung
u_{Gx}	Horizontales Profil der Gasgeschwindigkeit
u_{Gz}	Vertikales Profil der Gasgeschwindigkeit
$V_z(\gamma_{Tr,0})$	Vertikale Einsprühgeschwindigkeit der Tropfen
$V_{z,korr}(\gamma_{Tr,0})$	Vertikale, abgeminderte Einsprühgeschwindigkeit der Tropfen
x	Horizontale Koordinate
y	Horizontale Koordinate
z	Vertikale Koordinate
I	Bereich I der Flammen-/Rauchgaszone: Flammenzone

- II Bereich II der Flammen-/Rauchgaszone:
flackernde Flammenzone
- III Bereich II der Flammen-/Rauchgaszone:
Auftriebsbereich

1. EINLEITUNG

Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) befaßt sich in einem mehrjährigen Forschungsprogramm mit der qualitativen, aber insbesondere quantitativen Beschreibung der Brandausbreitung und dem Löscheinsatz bei gestapelten brennbaren Stoffen.

Als vorbeugende Brandschutzmaßnahmen werden in der Praxis ortsfeste Löschanlagen installiert, wobei als häufigstes Löschmittel Wasser verwendet wird.

Die bisherigen Forschungsarbeiten an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik befassen sich bezüglich der Brandausbreitung mit einer Literaturlauswertung des in- und ausländischen Schrifttums /1/ sowie der Durchführung von Großbrandversuchen /2,3,4,5,6/. Der zugehörige Löscheinsatz wird in den Arbeiten von Schatz /7,8,9,10,11,12,13/ untersucht.

Die Arbeit von Schatz und Kunkelmann /13/ enthält eine Literaturlauswertung über den Abbau eines einzelnen Wassertropfens durch Verdampfen in einer realen Brandbedingungen entsprechenden Heißgasströmung sowie dessen numerische Simulation. Hierbei wird die Anfangsgeschwindigkeit des Tropfens sowie dessen Einsprühwinkel vorgegeben und als Rauchgasströmung eine über einer Wärmequelle entstehende, nach oben gerichtete freie Konvektionsströmung angenommen. Der Tropfenabbau wird durch das Lösen der Wärme-, Stoff- und Impulsbilanzen am Einzeltropfen unter Zugrundelegung der für das System relevanten Anfangs- und Randbedingungen berechnet. In der Praxis ist die aus einer Sprinkleranlage austretende Löschwassermenge und die räumliche Verteilung des bei der Versprühung entstehenden Tropfenschwarmes ebenso wie die Tropfengröße und der Anfangsimpuls der Tropfen für den Löscherfolg ausschlaggebend. In /14/ wird ein über die Angaben in /13/ weiterführender Literaturüberblick gegeben, der sich mit dem Wärme-, Stoff- und Impulsaustausch des Tropfenschwarmes beschäftigt. Weiterhin werden Literaturstellen aufgeführt, die sich mit den Gesetzmäßigkeiten

für die Wechselwirkungen innerhalb eines Tropfenschwarmes beschäftigen. /15/ stellt eine Weiterführung der Untersuchungen in /14/ in Form einer numerischen Simulation dar. Es ist hierbei das Ziel, die Problematik der Wechselwirkungen eines aus einem Sprinkler austretenden Tropfenschwarmes mit dem Brand näher zu untersuchen. Es werden die Tropfengröße, der Sprinklervolumenstrom, die Sprinklerhöhe und die Wärmefreisetzung des Brandes variiert. Aus der gekoppelten Wärme-, Stoff- und Impulsbilanz zwischen den Tropfen und einer Heißgasströmung wird eine Tropfenbilanz ermittelt, die besagt, welcher Massenanteil bei den vorgegebenen Anfangs- und Randbedingungen den Sprinkler infolge der Auftriebsströmung wieder erreicht, welcher den Flammen-/Rauchgasbereich verläßt und welcher den Brandherd erreicht bzw. verdampft. Weiterhin wird die am Brandherd auftretende Wasserbeaufschlagung sowie die durch den Tropfenschwarm absorbierte Wärme berechnet. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die aus Versuchen gewonnenen Meßergebnisse über die Wasserbeaufschlagung der Schutzfläche verschiedener Sprinklertypen ohne Brandeinwirkung mit den Ergebnissen der numerischen Simulation zu vergleichen. Dies ist nicht nur von Bedeutung für die Beschreibung des Löschvorganges am Brandherd, sondern eine möglichst exakte Berechnung der Wasserbeaufschlagung ist auch eine Voraussetzung für eine Berechnung der Wechselwirkungen des Tropfenschwarmes mit den Flammen und Rauchgasen des Brandes. Man kann davon ausgehen, daß bei vorgegebenem Volumenstrom am Sprinkleraustritt und korrekt berechneter Wasserbeaufschlagung am Boden, die Tropfenkonzentration im Bereich zwischen Sprinkler und Boden ebenfalls realistische Werte annimmt. Diese Tropfenkonzentration ist die Grundlage für die Berechnung des Wärme-, Stoff- und Impulsaustausches zwischen der flüssigen und der gasförmigen Phase. An dieser Stelle sei z.B. die Abkühlung der heißen Rauchgase durch den Sprühnebel genannt.

2. ALLGEMEINE BESCHREIBUNG DES PROBLEMS

Um die Wasserbeaufschlagung errechnen zu können und um diese Werte mit den Meßwerten aus der Versuchseinrichtung der Forschungsstelle für Brandschutztechnik vergleichen zu können, mußte das Programm (Programmiersprache: FORTRAN 77), das in /13/ und /15/ ausführlich beschrieben wird, entsprechend erweitert werden. Bei den Versuchen wird das Löschwasser des Sprinklers in 25 im Quadrat angeordneten quadratischen Blechwannen (Kantenlänge je Wanne = 0,8 m) aufgefangen und die Wasserbeaufschlagung in mm/min gemessen. Die Versuche werden in den Arbeiten von Schatz /7,8,9,10,11,12,13/ beschrieben.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit beschränken sich auf Kaltversuche ohne Brandeinwirkung. Bei den 4 verwendeten Sprinklern handelt es sich um hängende Sprinkler. Die Sprinklertypen B, C und F sind Glasfaßsprinkler mit einer Öffnungstemperatur von 68°C, der Sprinkler E ist ein Schmelzlotsprinkler mit einer Öffnungstemperatur von 74°C. Für die Durchführung der Kaltversuche wurde jeweils das Auslöseelement entfernt.

Bild 1.1 zeigt das Modell und Bild 1.2 das Flußdiagramm zur numerischen Simulation mit Brandeinwirkung. Im kalten Fall liegen statt des Temperatur- und Geschwindigkeitsprofils durch die Rauchgasströmung Umgebungsbedingungen vor. Die Erweiterung gegenüber der Ausführung in /15/ besteht in der Wasserbeaufschlagung von 25 Wannens obiger Ausführung. Hierbei sei bemerkt, daß Wasserbeaufschlagungen nur dann miteinander verglichen werden können, wenn die Bezugsflächen übereinstimmen. Im vorliegenden Fall ist die Bezugsfläche jeweils eine Wanne der Abmessungen 0,8 m * 0,8 m (= 0,64 m²). Dies resultiert aus der Definition der Wasserbeaufschlagung:

$$\text{Wasserbeaufschlagung (mm/min)} = \frac{\text{Wassermenge (mm}^3\text{)}}{\text{Fläche (mm}^2\text{)} * \text{Zeit (min)}}$$

Ist zum Beispiel die Bezugsfläche (Auffangfläche) kleiner,

ergibt sich bei gleicher Wassermenge eine größere Wasserbeaufschlagung. Durch Festlegung der Wannenkoordinaten in x- und y-Richtung ist es möglich, zusammen mit den berechneten Flugbahnkoordinaten der jeweiligen Tropfen des Tropfenschwarmes nach dem Berechnungsverfahren in /13/ und /15/ die Wasserbeaufschlagung in den einzelnen Wannen zu berechnen.

Von entscheidender Bedeutung für die Wasserbeaufschlagung durch einen Sprinkler nach dem Auslösen ist dessen konstruktive Gestaltung (s. Bild 2). Diese beeinflusst zusammen mit dem Zerstäubungsdruck und dem Volumenstrom die Größe und Geschwindigkeit der Tropfen sowie die Form des Sprühkegels und damit die Wasserverteilung. Bei den konstruktiven Gestaltungsmerkmalen wären u.a zu nennen:

- Öffnungsquerschnitt des Sprinklers
- Durchflußkonstante des Sprinklers
- Gehäusegestaltung des Sprinklers
- Gestaltung des Deflektors

Insbesondere der Deflektor hat einen entscheidenden Einfluß auf das Sprühbild des Sprinklers. Die Verzahnung des Sprinklers ist, wie Fotoaufnahmen und Videoaufzeichnungen gezeigt haben, für die Bildung von Strähnen im Sprühbild verantwortlich, d.h. es liegen örtlich höhere Tropfenkonzentrationen vor und zwar an den Stellen, wo das Wasser mehr oder weniger ungehindert durch die Zwischenräume im Deflektor austreten kann. An den Zähnen liegt eine Stauströmung vor. Den Auftreffpunkt des Wasserstrahles auf den Zahn wird in der Strömungslehre /16/ vorderer Staupunkt genannt. Hier teilt sich die Stromlinie. Bei schlanken oder stromlinienförmigen Körpern schließt sich die Strömung wieder an der hinteren Körperkante zum hinteren Staupunkt zusammen. Bei kantigen Körpern tritt hinter dem Körper ein mehr oder minder ausgedehntes Totwassergebiet auf. Im Extremfall kann es zur Ausbildung eines Sprühhohlkegels kommen. Diese Totwassergebiete liegen beim Sprinkler an den Zähnen des Deflektors mehr oder weniger stark ausgeprägt vor. Weiterhin tritt eine Wirbelbildung am Deflektor auf.

Der Bügel des Sprinklers hat ebenfalls einen Einfluß auf das Sprühbild bezüglich Verwirbelungen und Totwassergebiet.

Diese, gegenüber eine normalen Düse, besonderen Eigenschaften eines Sprinklers erschweren dessen numerische Simulation. Zur Bewältigung dieser Aufgabe, wurde das vorhandene Programm entsprechend modifiziert. Hierauf wird in Abschnitt 3. näher eingegangen.

3. RANDBEDINGUNGEN UND ANNAHMEN FÜR DIE BERECHNUNGEN

3.1 ERGEBNISSE DER TROPFENGRÖSSEN-ANALYSE MIT EINEM PHASEN/DOPPLER-TEILCHENANALYSATOR

Von besonderer Bedeutung für die Simulation der Wasserbeaufschlagung ist die Kenntnis des Tropfenspektrums des jeweiligen Sprinklers. Hierfür wurden die an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik verwendeten Sprinklertypen von der Firma Lechler* bezüglich des Tropfenspektrums und der vertikalen Tropfengeschwindigkeit analysiert. Verwendet wurde hierzu ein Phasen/Doppler-Teilchenanalysator nach Bild 3. Bendig /17/ beschreibt die Funktionweise dieser Tropfenmeßeinrichtung wie folgt: Die Meßeinheit besteht aus einem Lasersender und -empfänger. Beide sind mit einem Personal Computer gekoppelt, über die die Meßergebnisse ausgewertet werden. Hierbei wird Laserlicht an den zu messenden Partikeln gestreut und ändert dabei seine Frequenz und Phasenlage, bezogen auf das Ausgangssignal. Der Laserstrahl wird durch eine spezielle Optik in 2 Strahlen aufgespalten, die sich mit einem kleinen Winkel zueinander ausbreiten. Diese Strahlen kreuzen sich in einem bestimmten Punkt im Raum. Dieser Punkt repräsentiert gleichzeitig den Meßpunkt. Tropfen, die durch diesen Bereich fallen, streuen das Licht der beiden Laserstrahlen und verschieben gleichzeitig

*Lechler GmbH + Co KG
Präzisionsdüsen · Anlagenbau
Höhenstraße 24
W-7012 Fellbach

die Frequenz (Doppler-Effekt) und die Phase der Lichtsignale. Während die Verschiebung der Phase mit der Größe der Tropfen zusammenhängt, ist die Frequenzverschiebung proportional zur Geschwindigkeit der Partikel. Das gestreute Licht wird durch ein System von Linsen aufgefangen und auf 3 Fotomultiplier fokussiert. Diese Lichtmeß-Detektoren zeichnen die Lichtsignale auf, die anschließend in einer schnellen Speichereinheit (Transientenrekorder) aufgezeichnet und im Computer mathematisch weiterverarbeitet werden. Mit dieser Tropfenmeßeinrichtung ist es möglich, Messungen mit hoher Zeit- und Raumauflösung und bis zu 50.000 Teilchen je Sekunde durchzuführen.

Von der Firma Lechler wurden verschiedene Arten von Verteilungen wie Anzahlhäufigkeitsverteilung, einfache Volumenverteilung, kumulierte Volumenverteilung und Geschwindigkeitsverteilung sowie weitere Kenndaten des Tropfenspektrums, wie Sauter-Durchmesser, Halbwertstropfendurchmesser, verschiedene Mittelwerte und Standardabweichung für die verschiedenen Sprinklertypen ermittelt. Auf die direkt mit dem Phasen/Doppler-Teilchenanalysator und der EDV-Anlage ermittelten Verteilungen und deren grafischen Darstellungen wird jedoch in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Vielmehr werden nur die, bei der numerischen Simulation verwendeten Größen wie Anzahlhäufigkeitsverteilung, Geschwindigkeitsverteilung, Sauter-Durchmesser D_{32} sowie die Größen volumenbezogener Halbwertstropfendurchmesser $D_{V50\%}$, anzahlbezogener Halbwertstropfendurchmesser $D_{A50\%}$ und der arithmetische Mittelwert D_{10} der Tropfendurchmesser weiter ausgewertet.

Die vorstehend genannten Durchmesser können wie folgt beschrieben werden:

- Sauter-Durchmesser D_{32} :

Wie die Untersuchungen in /14/ gezeigt haben, sollen in allen physikalischen und chemischen Vorgängen zur Bildung des mittleren Durchmessers die Teilchenabmessungen verwendet werden, die Einfluß auf den ablaufenden Prozeß haben. Für den Wärme- und Stoffaustausch, gekoppelt mit einer Bewegung der Tropfen, ist

dies der SAUTER-Durchmesser oder gleichwertiger Kugeldurchmesser D_{32} /18/, der die Summe aller Tropfenvolumina zu der Summe aller Tropfenoberflächen ins Verhältnis setzt.

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i D_{Ti}^3}{\sum_{i=1}^k n_i D_{Ti}^2}$$

- k : Anzahl der Durchmesserfraktionen
 n_i : Anzahl der Tropfen in der Fraktion i
 D_{Ti} : Mittlerer Tropfendurchmesser der Fraktion i in mm

Der Sauter-Durchmesser spielt für ein umströmtes Teilchen eine ähnliche Rolle wie der hydraulische Durchmesser für durchströmte Körper. Bei der numerischen Simulation wird dieser zur Charakterisierung des Monoschwarmes herangezogen.

- **volumenbezogener Halbwertstropfendurchmesser (zentraler Tropfendurchmesser) $D_{V50\%}$ nach /19/:**

Die Hälfte der Tropfenvolumina ist größer und die andere Hälfte ist kleiner als der Halbwertstropfendurchmesser $D_{V50\%}$. In einer Summenkurve der Volumenverteilung liegt dieser bei 50 %.

- **anzahlbezogener Halbwertstropfendurchmesser (zentraler Tropfendurchmesser) $D_{A50\%}$:**

Die Hälfte der Tropfenanzahl ist größer und die andere Hälfte ist kleiner als der Halbwertstropfendurchmesser $D_{A50\%}$. In einer Summenkurve der Anzahlverteilung liegt dieser bei 50 %.

- **arithmetischer Mittelwert D_{10} :**

Diesen Tropfendurchmesser erhält man aus dem arithmetischen Mittel der Werte in der Anzahlhäufigkeitsverteilung.

Bild 4 zeigt die Anzahlhäufigkeit von Tropfendurchmessern ver-

schiedener Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler. Aus anlagentechnischen Gründen konnten von der Firma Lechler die Tropfenspektren nur bei dieser Höhe ermittelt werden. Die Originaldiagramme der Firma Lechler werden in der Weise modifiziert, daß die große Anzahl der gemessenen Tropfengrößen in 5 Fraktionen zusammengefaßt werden. Es wird hierbei entsprechend der %-Anteile der Originalkurve ein gewichteter Mittelwert des Tropfendurchmessers für jede der 5 Fraktionen errechnet und dieser in Bild 4 dargestellt. Diese Datenreduzierung ist erforderlich, da das Programm zur numerischen Simulation eines Polyschwarmes in der gegenwärtigen Form maximal 5 Tropfengrößen mit den entsprechenden Massenanteilen verarbeiten kann. Die Diagramme sind so zu interpretieren, daß die Aufsummierung der bei den jeweils 5 Markierungen einer Kurve vorliegenden Anzahlhäufigkeitswerte 100% ergeben. Es ist eindeutig erkennbar, daß bei höherem Durchsatz, der im vorliegenden Fall durch eine Drucksteigerung von 0,5 bar Überdruck auf 5 bar Überdruck erzielt wurde, die Tropfengrößen beträchtlich abnehmen. Auch ergeben sich beim Vergleich der verschiedenen Sprinkler deutliche Unterschiede. Es ist erkennbar, daß bei kleinem Durchsatz (kleiner Druck) des jeweiligen Sprinklers sich die Hauptanzahl der Tropfen im Bereich bis 500 μm , beim großen Durchsatz (großer Druck) im Bereich bis 300 μm befinden. Die großen Tropfen liegen bei allen Sprinklertypen nur in sehr geringen Mengen vor.

In Bild 5 werden die volumenbezogenen Halbwertstropfendurchmesser von verschiedenen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler in Abhängigkeit vom Sprühradus dargestellt. Man erkennt auch hier wiederum die Abnahme der Tropfengröße bei größerem Durchsatz. Eine Abhängigkeit der Tropfengröße vom Radius des Sprühkegels ist nicht eindeutig feststellbar, obwohl eine leichte Tendenz zu erkennen ist, daß sich die größeren Tropfen mehr im äußeren Bereich aufhalten. Dies liegt mit großer Wahrscheinlichkeit an der größeren Masse der Tropfen und dem damit größeren Impuls.

Bild 6 zeigt den Sauter-Durchmesser von verschiedenen Sprinkler-

typen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler in Abhängigkeit vom Sprühhadius. Diese Durchmesser zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die volumenbezogenen Halbwertstropfendurchmesser.

In **Bild 7.1** wird der über dem Sprühkegelradius gemittelte volumenbezogene Halbwertstropfendurchmesser von verschiedenen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler gezeigt. Gleichzeitig werden die Sprinkleraustrittsdurchmesser angegeben. Die Tropfendurchmesser liegen beim kleinen Durchsatz zwischen ca. 1000 μm und 1500 μm und beim großen Durchsatz im Bereich zwischen ca. 390 μm und 640 μm . Man erkennt weiterhin, daß bei größerem Düsendurchmesser ein höherer Durchsatz erzielt wird, daß aber gleichzeitig die Tropfengröße beträchtlich herabgesetzt wird. Die Tropfengröße trägt aber wesentlich in Zusammenarbeit mit der Einsprühgeschwindigkeit dazu bei, daß, wie in /13/, /14/ und /15/ gezeigt wurde, der Brandherd bei der im Brandfall vorliegenden heißen Rauchgasgegenströmung erreicht werden kann.

In **Bild 7.2** werden die über dem Sprühkegelradius gemittelten anzahlbezogenen Halbwertstropfendurchmesser von verschiedenen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler dargestellt. Diese sind wesentlich kleiner als die volumenbezogenen und liegen beim kleinen Durchsatz zwischen 270 μm und 340 μm und beim großen Durchsatz zwischen ca. 130 μm und 200 μm .

Bild 8 zeigt den über dem Sprühkegelradius gemittelten arithmetischen Tropfendurchmesser von verschiedenen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler. Diese Tropfendurchmesser liegen beim kleinen Durchsatz zwischen ca. 400 μm und 510 μm und beim großen Durchsatz im Bereich zwischen ca. 180 μm und 260 μm .

Bild 9 zeigt den über dem Sprühkegelradius gemittelten Sauter-Durchmesser von verschiedenen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler. Die

Tropfendurchmesser liegen beim kleinen Durchsatz zwischen ca. 900 μm und 1250 μm und beim großen Durchsatz im Bereich zwischen ca. 350 μm und 530 μm .

Anhand fotografischer Aufnahmen wurden die Sprühkegelwinkel aus Versuchen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik mit verschiedenen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler ermittelt. Direkt am Sprühteller beträgt der Ausbreitungswinkel bei allen Sprinklern ca. 180° . Anschließend stellt sich der Winkel nach Bild 10 ein. Es konnte kein nennenswerter Unterschied bei gleichem Sprinklertyp aber unterschiedlichen Durchsätzen ermittelt werden.

Bild 11 zeigt die mittleren vertikalen Geschwindigkeiten der verschiedenen Tropfengrößen bei unterschiedlichen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler. Die Geschwindigkeiten nehmen mit wachsendem Tropfendurchmesser infolge der großen Gewichtskraft und des großen Impulses zu. Besonders beim Typ E werden große vertikale Tropfengeschwindigkeiten erzielt, was einer guten Löschwirkung zu Gute kommt.

3.2 ANNAHMEN FÜR DIE BERECHNUNGEN

Wie bereits in Abschnitt 2. angedeutet wird, werden die Grundlagen und die Arbeitsweise des Programmes zur numerischen Simulation in bereits veröffentlichten Forschungsberichten der Forschungsstelle für Brandschutztechnik /13/, /14/ und /15/ ausführlich behandelt.

Zur Berechnung der Wasserbeaufschlagung der 25 quadratischen Wannen wurden folgende Randbedingungen und Annahmen festgelegt:

Als Tropfengröße bei einem Monoschwarm, bei dem alle Tropfen des Tropfenschwarmes den gleichen Durchmesser aufweisen, wird der Sauter-Durchmesser der verschiedenen Sprinkler-Typen verwendet. Bei den Berechnungen hat sich gezeigt, daß hiermit die be-

rechnete Wasserbeaufschlagung am ehesten mit den Meßwerten übereinstimmt. Bei der Simulation des Sprinklers vom Typ E wird zusätzlich ein Polyschwarm mit 5 verschiedenen Fraktionen zum Vergleich herangezogen. Hierfür wird die Anzahlhäufigkeitsverteilung verwendet und in 5 Fraktionen zusammengefaßt. Diese Tropfen werden als Eintrittstropfendurchmesser und damit als eine der Anfangsbedingungen im Programm verwendet. Durch diese Annahme wird vernachlässigt, daß sämtliche Tropfengrößen in einer Höhe von 1,5 m unterhalb des Sprinklers ermittelt wurden. Im Brandfall würde sich das Tropfenspektrum über diese Distanz durch die heiße Rauchgasströmung z.B. durch Verdunstung, Verdampfung und Verwirbelungen verändern. Im kalten Fall kann man mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, daß sich das Tropfenspektrum nicht nennenswert verändert. Vorgegeben wird weiterhin der Volumenstrom und der Austrittsdurchmesser der verschiedenen Sprinklertypen. Mit den Tropfengrößen werden nun die entsprechenden Tropfenzahlen ermittelt und nach dem Verfahren in /15/ nach Bild 1 auf einen Sprühkegel verteilt. Aus dem Volumenstrom und dem Austrittsdurchmesser wird eine für alle Tropfen gleiche resultierende Anfangsgeschwindigkeit errechnet. Diese Anfangsgeschwindigkeit wird mit Hilfe der Einsprühwinkel zwischen dem kleinsten Einsprühwinkel (z.B. 0°) und dem größten Einsprühwinkel (z.B. halber Kegelwinkel = 90°) in eine vertikale und horizontale Geschwindigkeitskomponente der Tropfen zerlegt. Durch die Annahme der Symmetrie ergibt sich bei einem halben Kegelwinkel von 90° ein Gesamtkegelwinkel von 180° . Bei den ersten Berechnungen wurde zunächst nur der Sprühkegelwinkel nach Bild 10 verwendet, der anhand fotografischer Aufnahmen gemessen wurde und der dem Betrachter bei der Versuchsbeobachtung unmittelbar ins Auge fällt. Dieser Winkel ist wesentlich kleiner als 180° . Die hiermit ermittelten Wasserbeaufschlagungen weichen sehr stark von den Meßwerten ab. Hieraufhin wurden die Aufnahmen erneut ausgewertet und es wurde erkannt, daß direkt am Deflektor bei allen Sprinklern ein Gesamtwinkel von 180° vorliegt und sich erst dann ein Sprühkegelwinkel nach Bild 10 einstellt. Wie bereits in Abschnitt 2. erläutert wird, treten durch den Deflektor Unregelmäßigkeiten im Sprühbild auf, die sich unmittelbar auf die Wasserbeaufschlagung auswirken. Z.B. treten Staupunkte auf,

an denen die vertikale Tropfenanfangsgeschwindigkeit Null wird und es u.a. zu Strähnenbildungen im Sprühbild kommt. Da bisher noch keine Meßwerte über die Verteilung der verschiedenen horizontalen und vertikalen Tropfengeschwindigkeiten für die verschiedenen Tropfengrößen bei den verschiedenen Sprinklertypen am Deflektor vorliegen, wurde das Programm so gestaltet, daß auf die vertikale und horizontale Anfangsgeschwindigkeit der Tropfen über Abminderungsfaktoren für die vertikale Einsprühgeschwindigkeit zusätzlich, außer über die Geschwindigkeitszerlegung durch den Sprühkegelwinkel, Einfluß genommen werden kann. Das Programm bietet die Möglichkeit, in 3 Bereichen des Sprühkegels die vertikale Einsprühgeschwindigkeit im Bereich zwischen $k_{\text{vert}} = 0\%$ und $k_{\text{vert}} = 100\%$ abzumindern. Die vertikale, abgeminderte Einsprühgeschwindigkeit $v_{z,\text{korr}}(\gamma_{\text{Tr},0})$ der Tropfen ergibt sich daher zu:

$$v_{z,\text{korr}}(\gamma_{\text{Tr},0}) = (1 - (k_{\text{vert}}/100)) * v_z(\gamma_{\text{Tr},0})$$

Auf die Berechnung der vertikalen Geschwindigkeitskomponente $v_z(\gamma_{\text{Tr},0})$ sowie der horizontalen Geschwindigkeitskomponente wird in /13/ näher eingegangen.

Beim unteren Grenzwert 0% ergeben sich die vertikale und horizontale Geschwindigkeitskomponente rein aus den Einsprühwinkeln, beim oberen Grenzwert 100% besitzen die Tropfen keine Vertikalgeschwindigkeit und haben daher nur eine Horizontalgeschwindigkeit.

4. VERGLEICH DER MEßWERTE MIT DEN ERGEBNISSEN DER NUMERISCHEN SIMULATION DER WASSERBEAUFSCHLAGUNG BEI VERSCHIEDENEN SPRINKLERN

Wie die nachfolgenden Ausführungen zeigen, können die gemessenen Wasserbeaufschlagungen durch das vorhandene Programm mehr oder weniger gut, aber zumindest näherungsweise rechnerisch bestätigt werden. Bedingt durch das Gehäuse, sowie durch fertigungstechnisch bedingte Ungenauigkeiten wird bei sämtlichen untersuchten Sprinklern kein gleichmäßiges Sprühbild im Gegensatz zur

numerischen Simulation erzielt.

4.1 SPRINKLER: TYP C

Bild 12.1 zeigt die Meßwerte für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ C bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 109 l/min. **Bild 12.2** zeigt die errechneten Werte der Wasserbeaufschlagung mit dem Sauter-Durchmesser (Monoschwarm). Für einen Volumenstrom von 326 l/min werden die Meß- und Simulationswerte in den **Bildern 12.3** und **12.4** dargestellt.

Man erkennt, daß bei diesem Sprinkertyp eine relativ geringe Wasserbeaufschlagung direkt unter dem Sprinkler erzielt wird. Ein Teil des Wassers wird über die Wannenfläche hinausgespritzt. Durch die Erhöhung des Volumenstromes von 109 l/min auf 326 l/min nimmt die Wasserbeaufschlagung beträchtlich zu. Die Wassermenge spielt hierbei die entscheidende Rolle. Ebenfalls wird durch den größeren Volumenstrom die Impulsabnahme infolge der kleineren Tropfenmasse durch eine höhere Einsprühgeschwindigkeit kompensiert. In den Legenden der Bilder 12.2 und 12.4 erkennt man die Bereiche, in denen die Vertikalgeschwindigkeit abgemindert werden muß, um ein vergleichbares Berechnungsergebnis zu erzielen. Zwischen 0° und 10° (entsprechend einem Gesamtwinkel von 20°) des Sprühkegels wird die vertikale Einsprühgeschwindigkeit der Tropfen um 10%, zwischen 11° und 50° (entsprechend einem Gesamtwinkel von 22° bis 100°) um 70% und zwischen 51° und 90° (entsprechend einem Gesamtwinkel von 102° bis 180°) um 0% abgemindert.

4.2 SPRINKLER: TYP B

Die **Bilder 13.1, 13.2, 13.3, 13.4** zeigen die Meß- und Berechnungswerte für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ B bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und den Volumenströmen 61 l/min bzw. 180 l/min unter

Berücksichtigung des Sauter-Durchmessers (Monoschwarm). Dieser Typ zeigt eine stärkere Beaufschlagung im Bereich unterhalb des Sprinklers. Die vertikale Einsprühgeschwindigkeit im Bereich 2 wird gegenüber Sprinkler-Typ C nur im Bereich von 11° bis 30° um 50% abgemindert. Auch hier gilt das bereits unter Abschnitt 4.1 Gesagte bei der Vergrößerung des Volumenstromes.

4.3 SPRINKLER: TYP F

Die Bilder 14.1, 14.2, 14.3 und 14.4 zeigen die Meß- und Berechnungswerte für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ F bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und den Volumenströmen 61 l/min bzw. 180 l/min unter Berücksichtigung des Sauter-Durchmessers (Monoschwarm). Dieser Sprinkler-Typ zeigt bei beiden Volumenströmen eine sehr geringe Wasserbeaufschlagung über der Wannenfläche. Ein großer Teil des Wassers wird außerhalb des Wannenbereiches verteilt. Um diesen Fall näherungsweise simulieren zu können, wird die vertikale Einsprühgeschwindigkeit im Bereich zwischen 10° und 90° um 99,7% abgemindert. Wegen programmspezifischer Stabilitätsprobleme ist dieser Wert statt 100% gewählt worden. Dieser Sprinkler erzeugt von allen untersuchten Typen beim großen Durchsatz den kleinsten Sauter-Durchmesser (s. Bild 9) und bei der Anzahlhäufigkeitsverteilung (s. Bild 4) die meisten kleinen Tropfen. Dies bedeutet, daß die Mehrzahl der Tropfen nur einen kleinen Impuls aufweisen und daher rasch in den Schwebzustand gelangen, ohne die Wannen zu erreichen. Durch die Lufteinsaugung des Sprühkegels und durch Verwirbelungen werden die Tropfen leicht nach außen getragen. Diese Tatsache wird sich besonders im Brandfall bei einer vorliegenden Rauchgasgegenströmung bemerkbar machen.

4.4 SPRINKLER: TYP E

Die Bilder 15.1 bis 15.4 zeigen die Meß- und Berechnungswerte

für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ E bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und dem Volumenstrom 163 l/min. Dieser Sprinkler zeigt eine extrem große Wasserbeaufschlagung im Bereich unterhalb des Sprinklers.

Bild 15.2 zeigt das Ergebnis der Berechnungen bei Verwendung des Sauter-Durchmessers (Monoschwarm) mit den entsprechenden Abminderungsfaktoren für die vertikale Einsprühgeschwindigkeit. Dieses kann näherungsweise für die Simulation der Meßwerte nach **Bild 15.1** herangezogen werden.

Wird bei gleichen Abminderungsfaktoren statt des Sauter-Durchmessers ein Polyschwarm mit 5 Fraktionen verwendet, so ergibt sich die berechnete Wasserbeaufschlagung nach **Bild 15.3** (Polyschwarm, Fall I). Hier ist der Wert der Wasserbeaufschlagung in der Wanne direkt unter dem Sprinkler viel zu hoch. **Bild 15.4** (Polyschwarm, Fall II) zeigt das Berechnungsergebnis bei einer Erhöhung der Abminderung in Bereich 2 auf 95 %. Auch hier zeigt die mittlere Wanne eine, wenn auch geringere, zu große Wasserbeaufschlagung.

Die Bilder 15.5 bis 15.8 zeigen die Meß- und Berechnungsergebnisse für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ E bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und dem Volumenstrom 445 l/min. Die Wasserbeaufschlagung vergrößert sich hier wiederum sehr deutlich. Ansonsten gilt das gleiche wie bei kleinem Durchsatz.

Die hohen Wasserbeaufschlagungen bei Sprinkler-Typ E werden durch die hohen vertikalen Tropfengeschwindigkeiten nach **Bild 11** unmittelbar einleuchtend. Der mittlere Sauter-Durchmesser nach **Bild 9** bewegt sich dagegen nur im Mittelfeld. Der große Impuls der Tropfen dieses Sprinklers wird daher hauptsächlich durch die hohe Einsprühgeschwindigkeit der Tropfen erzielt.

Die Wasserbeaufschlagung beim Sprinklertyp E kann mit dem Programm in der jetzigen Form bei der Berücksichtigung von 5 Fraktionen nur ungenau simuliert werden. Dieses trifft auch für

die anderen Sprinkler-Typen zu. Auf diese Berechnungsergebnisse wird hier jedoch nicht weiter eingegangen.

5. AUSBLICK

Mit der hier durchgeführten Arbeit wird eine Grundlage dafür geschaffen, Brand- und Löschversuche unter Berücksichtigung eines realen Tropfenschwarmes numerisch zu simulieren.

Für dieses Berechnungsverfahren müssen die Anfangs- und Randbedingungen möglichst genau festgelegt werden. Bisher wurden die Tropfengrößen und deren Geschwindigkeitskomponenten in horizontaler und vertikaler Richtung direkt beim Verlassen des Deflektors meßtechnisch noch nicht erfaßt. Die Tropfengrößen in dieser Arbeit wurden bei einer Höhe von 1,5 m ermittelt. Dies ist vorallem im Brandfall von Bedeutung, da sich durch die heißen Rauchgase die Tropfengrößen und die Tropfengeschwindigkeiten durch Gegenströmung, Verdunstung, Verdampfung, Lufteinsaugung durch den Sprühnebel, Verwirbelungen etc. zeitlich und örtlich verändern. Auch im kalten Fall ändern sich die Tropfengeschwindigkeiten und Tropfendurchmesser etwas durch Auftrieb und Verdunstung.

Da die Wasserbeaufschlagung bei der Berücksichtigung eines Polyschwarmes bisher nur ungenau simuliert wird, muß das vorhandene Programm noch verfeinert werden. Eine Möglichkeit besteht darin, daß die Abminderung der vertikalen Anfangsgeschwindigkeit für jede Tropfengröße getrennt erfolgt. Weiterhin muß die Lufteinsaugung durch den Sprühnebel berücksichtigt werden. Bezüglich der Lufteinsaugung werden gegenwärtig beim Verband der Sachversicherer in Köln Untersuchungen durchgeführt, die gegebenenfalls bei deren Veröffentlichung im Programm Verwendung finden könnten.

Bezüglich der Simulation im Brandfall muß das Programm so erweitert werden, daß auch das Abbrandverhalten z.B. realer Lageraufbauten mit deren komplizierten Abbrandverhalten sowie dem

Löschvorgang simuliert werden kann.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieser Arbeit ist es, die aus Versuchen gewonnenen Meßergebnisse über die Wasserbeaufschlagung der Schutzfläche verschiedener Sprinklertypen ohne Brandeinwirkung mit den Ergebnissen der numerischen Simulation zu vergleichen. Dies ist nicht nur von Bedeutung für die Beschreibung des Löschvorganges am Brandherd, sondern eine möglichst exakte Berechnung der Wasserbeaufschlagung ist auch eine Voraussetzung für eine Berechnung der Wechselwirkungen des Tropfenschwarmes mit den Flammen und Rauchgasen des Brandes.

Es wurden Kaltversuche mit 4 verschiedenen Sprinklertypen durchgeführt, deren Löschwasser in 25 im Quadrat angeordneten quadratischen Blechwannen aufgefangen und die Wasserbeaufschlagung gemessen wurde.

Die Sprühnebel der verschiedenen Sprinklertypen wurden bezüglich des Tropfenspektrums und der vertikalen Tropfengeschwindigkeit mit einem Phasen/Doppler-Teilchenanalysator analysiert.

Das entwickelte Programm gestattet es, diese Wasserbeaufschlagung zu simulieren. Hierbei kann sowohl ein Monoschwarm mit einer konstanten Tropfengröße als auch ein Polyschwarm mit maximal 5 Tropfenfraktionen untersucht werden.

Von entscheidender Bedeutung für die Wasserbeaufschlagung durch einen Sprinkler nach dem Auslösen ist dessen konstruktive Gestaltung. Diese beeinflußt zusammen mit dem Zerstäubungsdruck und dem Volumenstrom die Größe und Geschwindigkeit der Tropfen sowie die Form des Sprühkegels und damit die Wasserverteilung. Insbesondere der Deflektor hat einen entscheidenden Einfluß auf das Sprühbild des Sprinklers. Bedingt durch das Gehäuse, sowie durch fertigungstechnisch bedingte Ungenauigkeiten wird bei sämtlichen untersuchten Sprinklern kein gleichmäßiges Sprühbild

im Gegensatz zur numerischen Simulation erzielt.

Wie die Untersuchungen gezeigt haben, können die gemessenen Wasserbeaufschlagungen durch das vorhandene Programm näherungsweise verhältnismäßig gut bei der Berücksichtigung eines Monoschwarmes mit dem Sauter-Durchmesser rechnerisch bestätigt werden.

Bei der Berücksichtigung eines Polyschwarmes mit 5 Fraktionen kann die Wasserbeaufschlagung mit dem Programm in der jetzigen Form nur ungenau simuliert werden.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ Brein, D.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 1: Literaturlauswertung.
Forschungsbericht Nr. 55 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1985)
- /2/ Brein, D.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 2: Großbrandversuche 1.
Forschungsbericht Nr. 58 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1986)
- /3/ Brein, D.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 3: Großbrandversuche 2.
Forschungsbericht Nr. 64 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1988)

- /4/ Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 4: Großbrandversuche 3.
Forschungsbericht Nr. 65 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1988)
- /5/ Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 5: Großbrandversuche 4.
Forschungsbericht Nr. 68 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1989)
- /6/ Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.
Teil 6: Großbrandversuche 5.
Forschungsbericht Nr. 72 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1989)
- /7/ Schatz, H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 1: Literaturlauswertung und

Errichtung der Versuchsanlage.
Forschungsbericht Nr. 53 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer-
wehrangelegenheiten.

Karlsruhe: Forschungsstelle für
Brandschutztechnik 1985.

/8/ Schatz,H.:

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 3: Entwicklung und Einsatz von
Sprinklern.

Forschungsbericht Nr. 57 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer-
wehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für
Brandschutztechnik (1986)

/9/ Schatz,H.:

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 4: Löschversuche mit Sprinklern 1.

Forschungsbericht Nr. 62 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer
wehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für
Brandschutztechnik (1987)

/10/ Schatz,H.:

Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 5: Löschversuche mit Sprinklern 2.

Forschungsbericht Nr. 67 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer-
wehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für

Brandschutztechnik (1988)

- /11/ Schatz,H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 6: Löschversuche mit Sprinklern 3.
Forschungsbericht Nr. 70 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer
wehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für
Brandschutztechnik (1989)
- /12/ Schatz,H.: Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Teil 7: Literaturlauswertung und
Simulation der Wasserbeaufschlagung.
Forschungsbericht Nr. 74 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer
wehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für
Brandschutztechnik (1990)
- /13/ Schatz,H. Löscheinsatz bei gelagerten Stoffen.
Kunkelmann,J.: Teil 2: Literaturübersicht und Be-
rechnungsgrundlagen für die Wärme-
übertragung bei Tropfen in einer
Heißgasströmung.
Forschungsbericht Nr. 54 der Arbeits-
gemeinschaft der Innenministerien der
Bundesländer.
Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuer-
wehrangelegenheiten.
Karlsruhe, Forschungsstelle für
Brandschutztechnik (1985)
- /14/ Kunkelmann,J.: Brandausbreitung bei verschiedenen
Stoffen, die in lagermäßiger An-

ordnung gestapelt sind.

Teil 7: Literaturübersicht über die Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes mit einer Heißgasströmung.

Forschungsbericht Nr. 76 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1990)

/15/ Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen, die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind.

Teil 8: Simulation der Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes mit einer Heißgasströmung.

Forschungsbericht Nr. 80 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer.

Arbeitskreis V - Unterausschuß Feuerwehrangelegenheiten.

Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (1991)

/16/ Bohl, W.: Technische Strömungslehre.

6. Auflage, Würzburg: Vogel-Buchverlag 1984

/17/ Bendig, L.: Tropfengrößenanalyse an Zerstäubungsdüsen. Firmenschrift der Firma Lechler, Metzingen 1988

/18/ Zogg, M.: Verfahrenstechnik I.

Blaue TR-Reihe Heft 131, Bern und Stuttgart: Verlag Technische Rundschau 1977

/19/ Schiefer, K.: Verfahrenstechnik, Nahrungsmitteltechnik
und Haushaltstechnik.
rororo Technik-Lexikon, Hamburg: Rowohlt
Taschenbuch Verlag 1972

8. BILDER

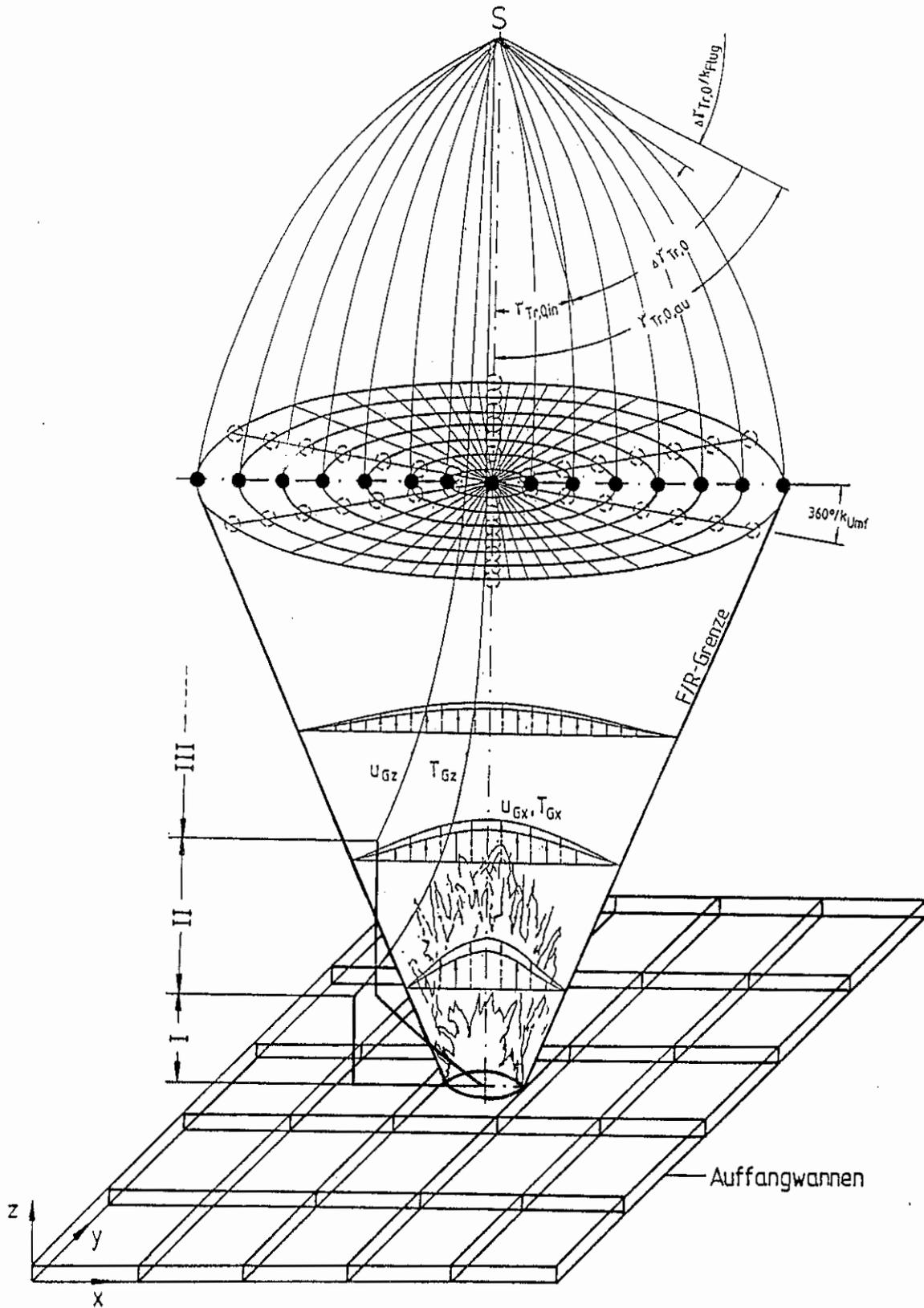


Bild 1.1 Modell zur Berechnung der Wechselwirkungen eines Tropfenschwarmes mit einer Heißgasströmung und der Wasserbeaufschlagung.

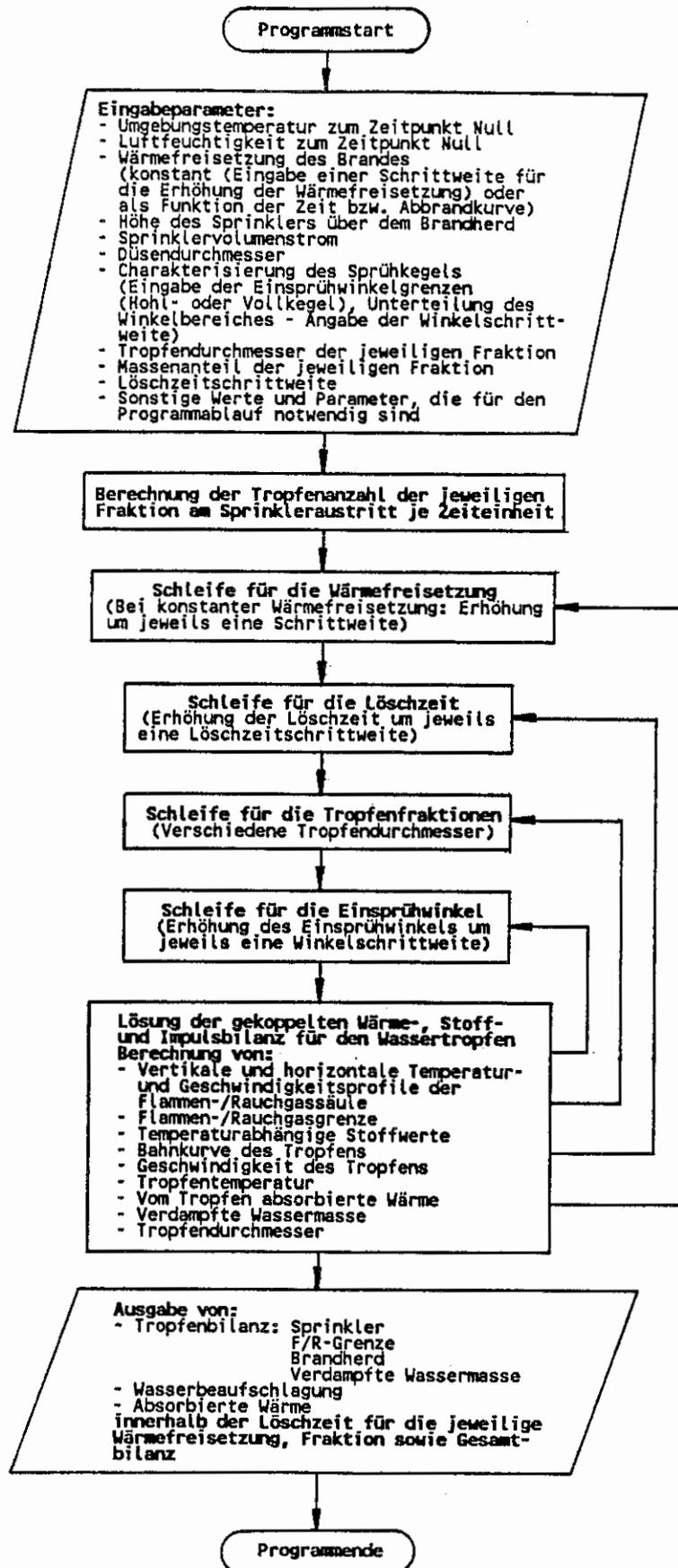


Bild 1.2 Flußdiagramm zur numerischen Simulation.

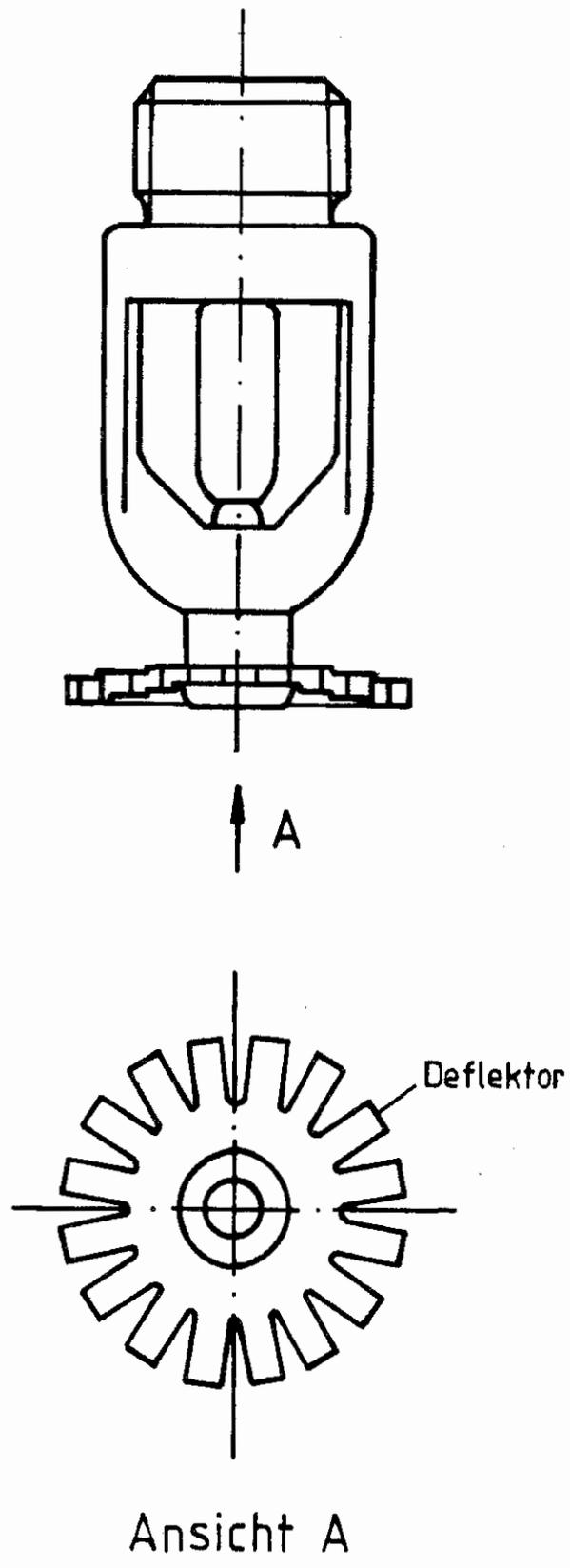


Bild 2 Prinzipskizze eines Sprinklers

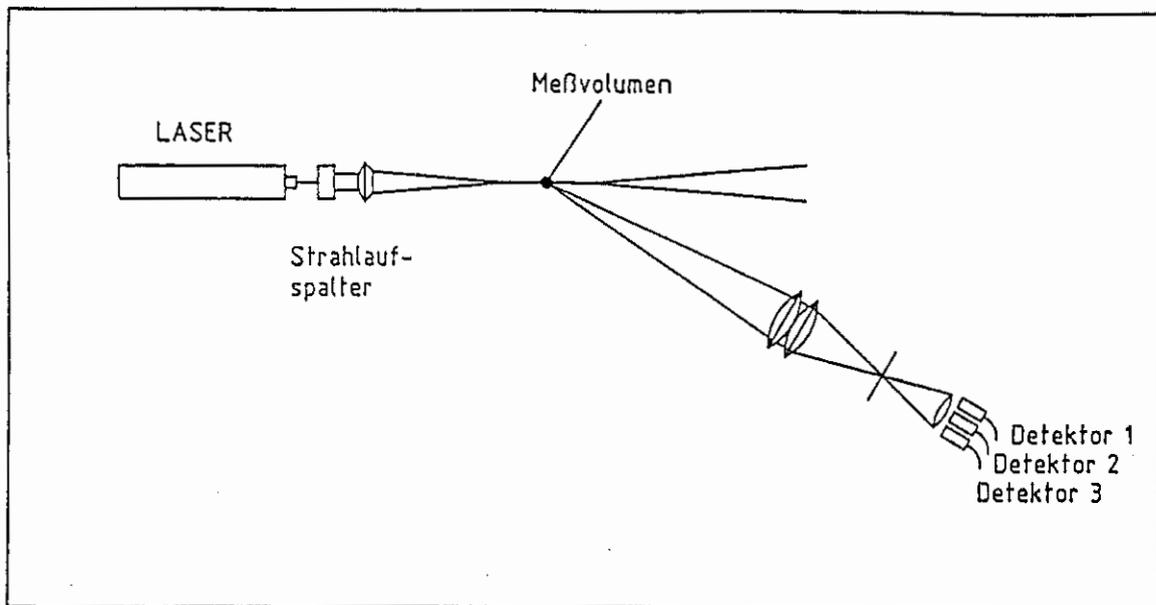


Bild 3 Prinzipskizze des Phasen/Doppler-Teilchen-
analysators nach /17/.

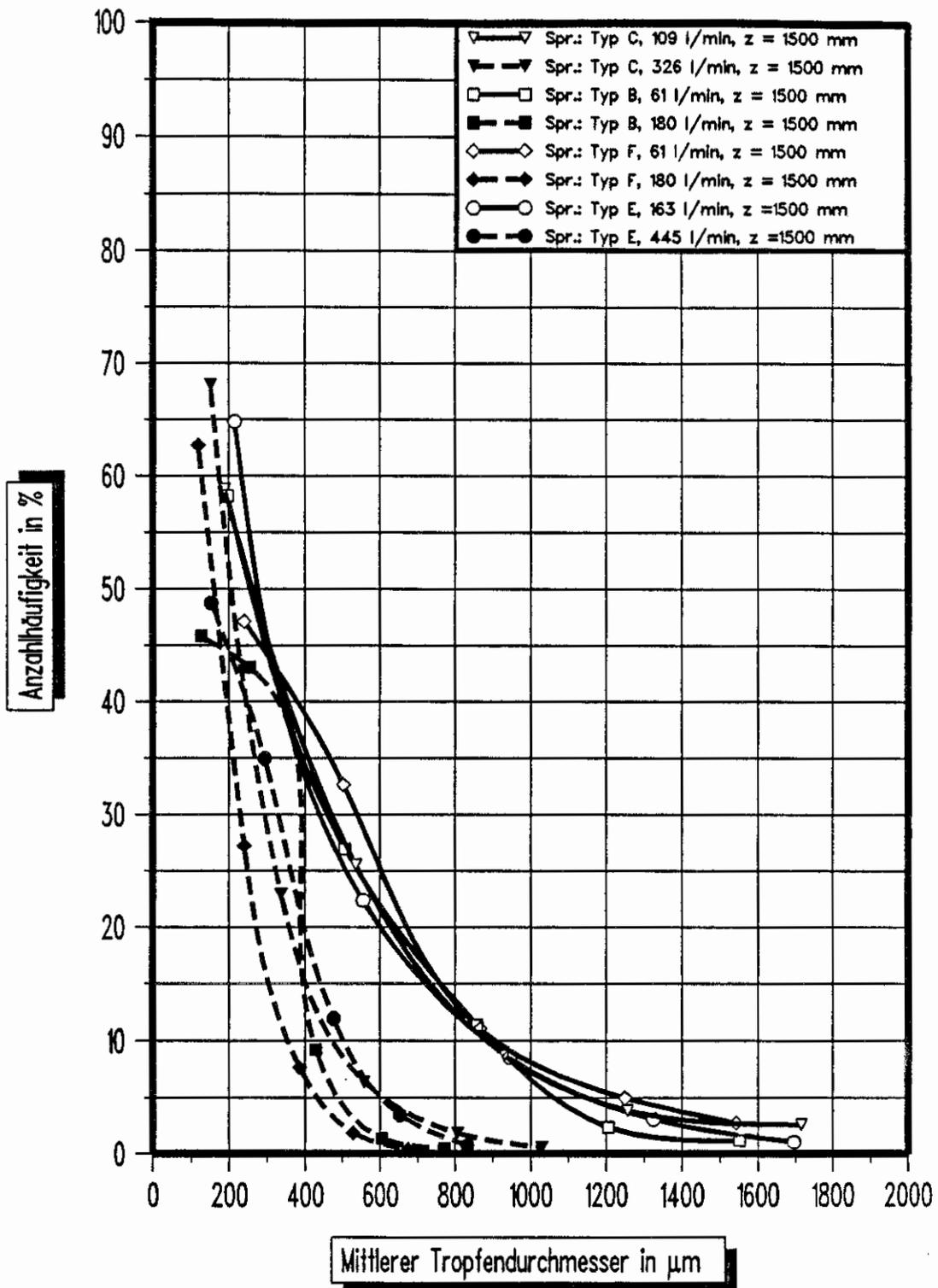


Bild 4 Anzahlhäufigkeit von Tropfendurchmessern verschiedener Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler (Zusammenfassung in 5 Fraktionen).

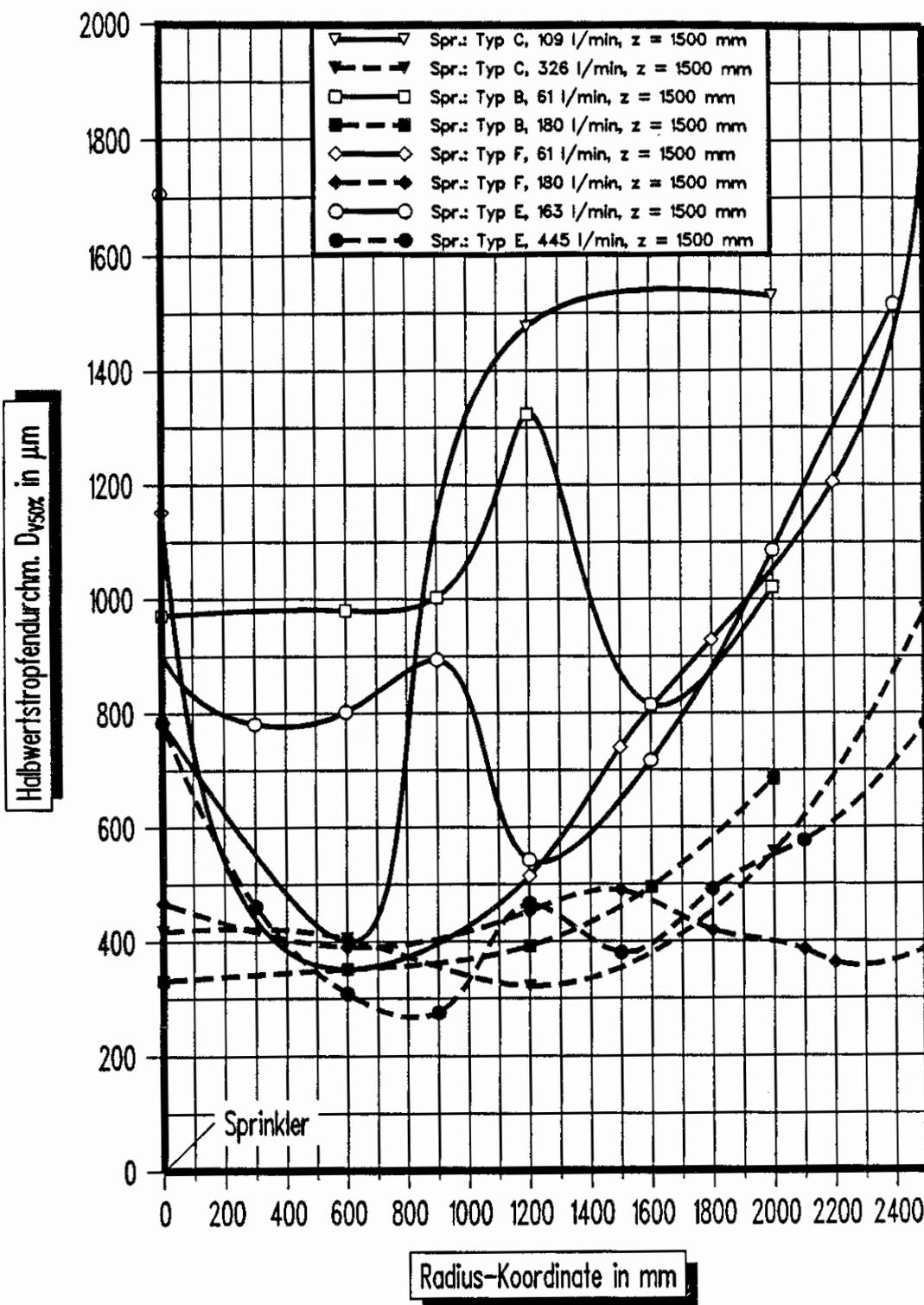


Bild 5 Volumenbezogene Halbwertstropfendurchmesser von verschiedenen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler in Abhängigkeit vom Sprühradus.

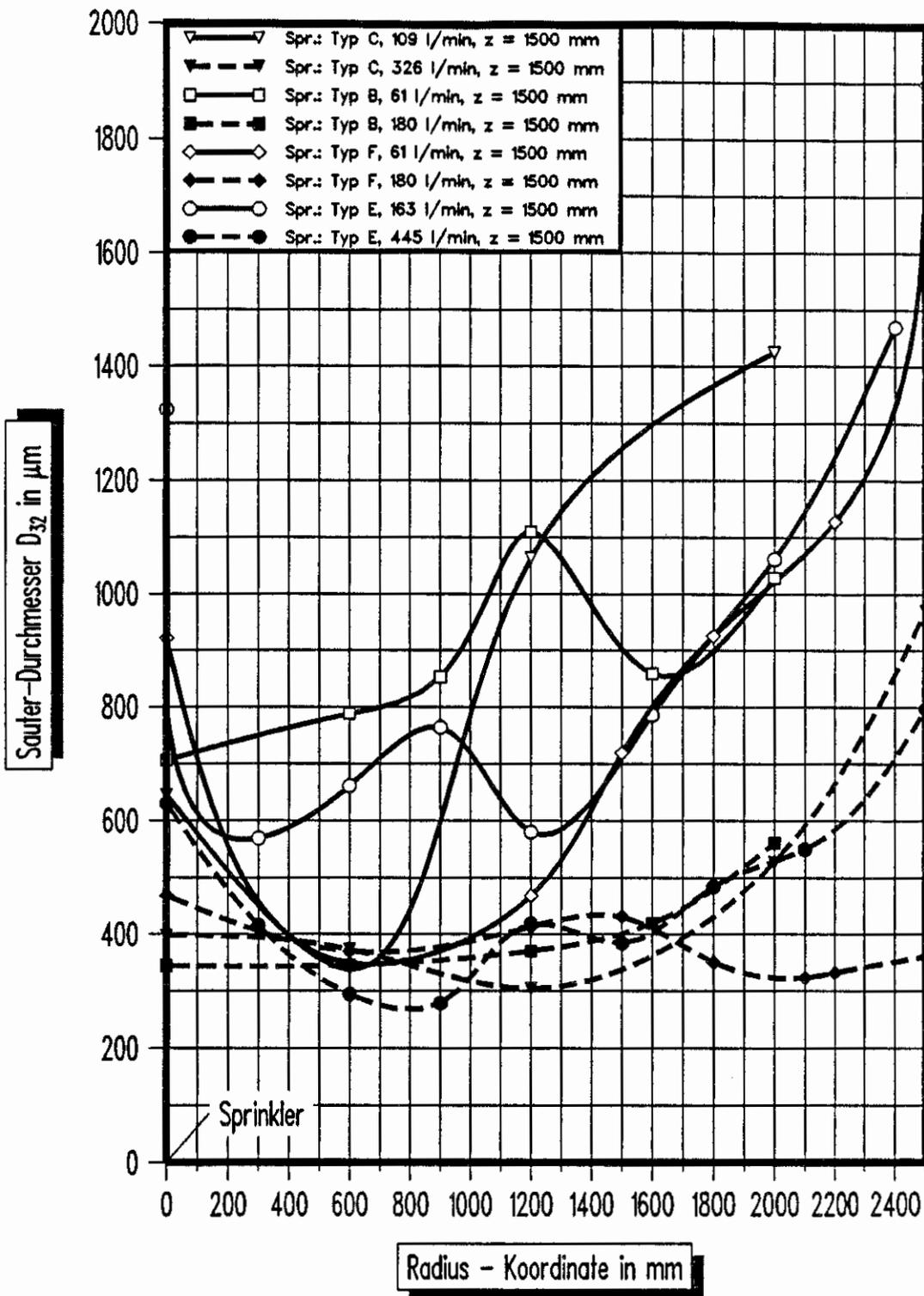


Bild 6 Sauter-Durchmesser von verschiedenen Sprinkler-typen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler in Abhängigkeit vom Sprühradus.

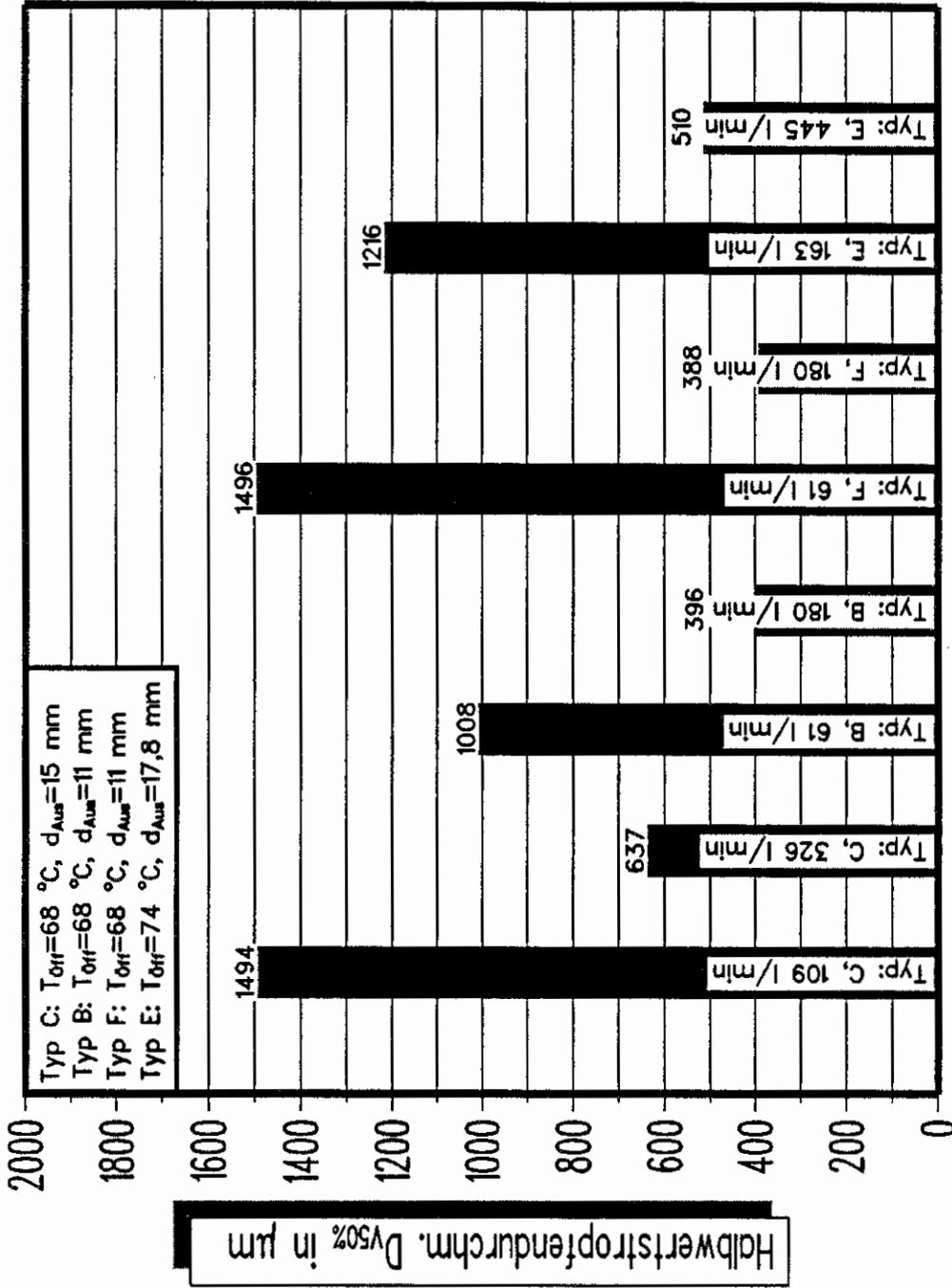


Bild 7.1 Über dem Sprühkegelradius gemittelte volumenbezogene Halbwertstropfendurchmesser von verschiedenen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler.

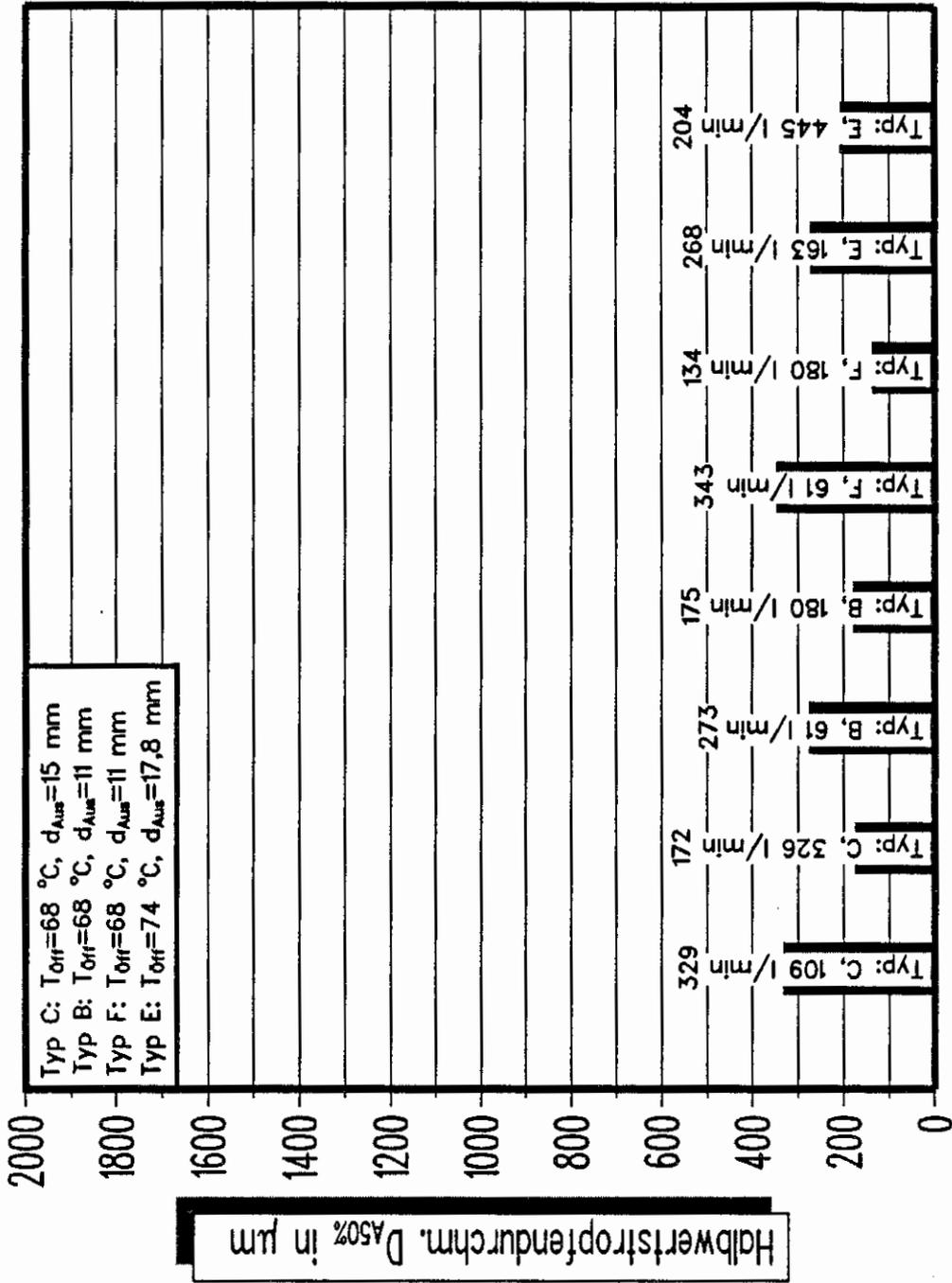


Bild 7.2 Über dem Sprühkegelradius gemittelte anzahlbezogene Halbwertstropfendurchm. $D_{50\%}$ in μm über dem Sprühkegelradius gemittelte anzahlbezogene Halbwertstropfendurchmesser von verschiedenen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler.

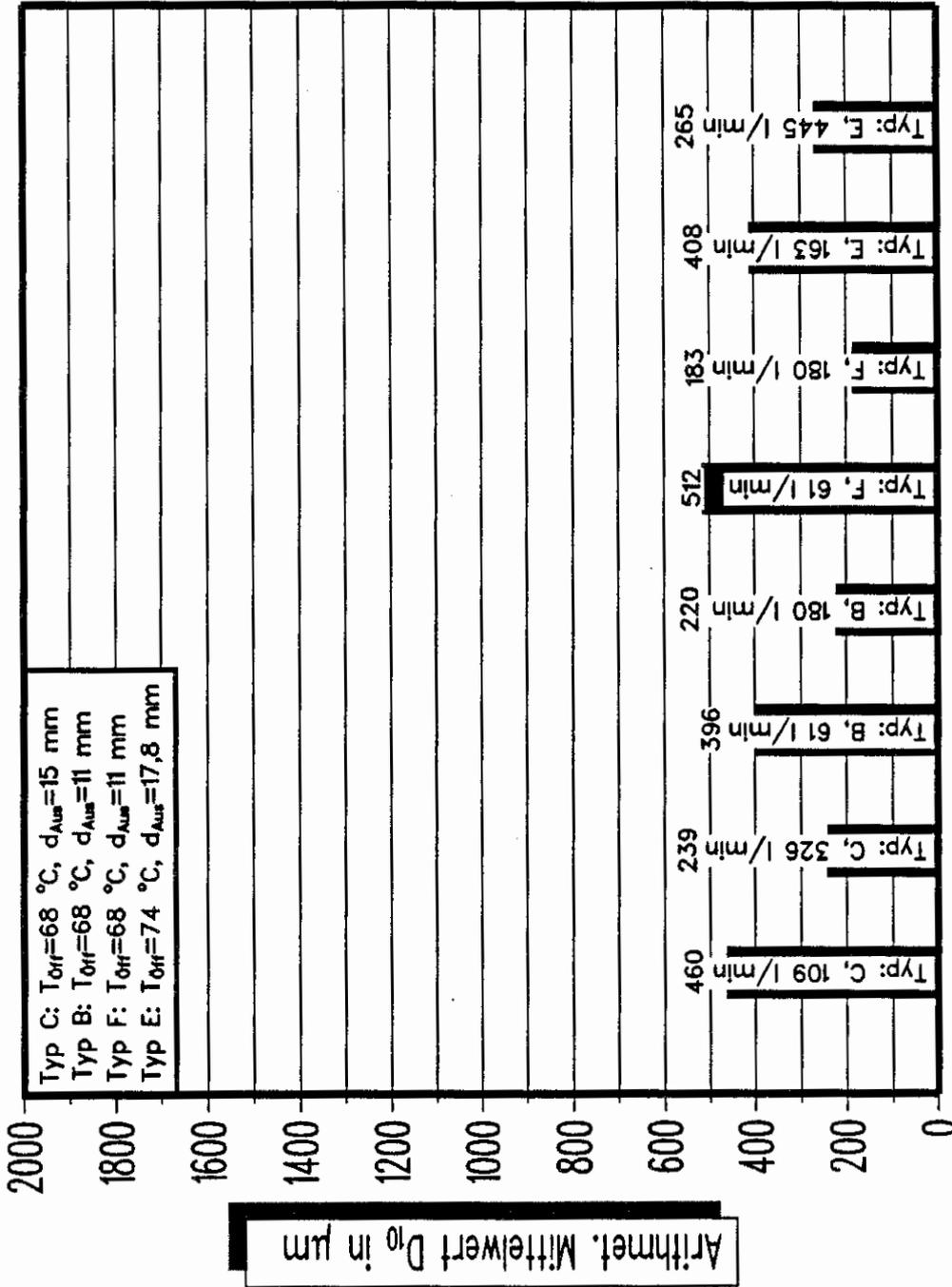


Bild 8 Über dem Sprühkegelradius gemittelte arithmetische Mittelwerte der Tropfendurchmesser von verschiedenen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler.

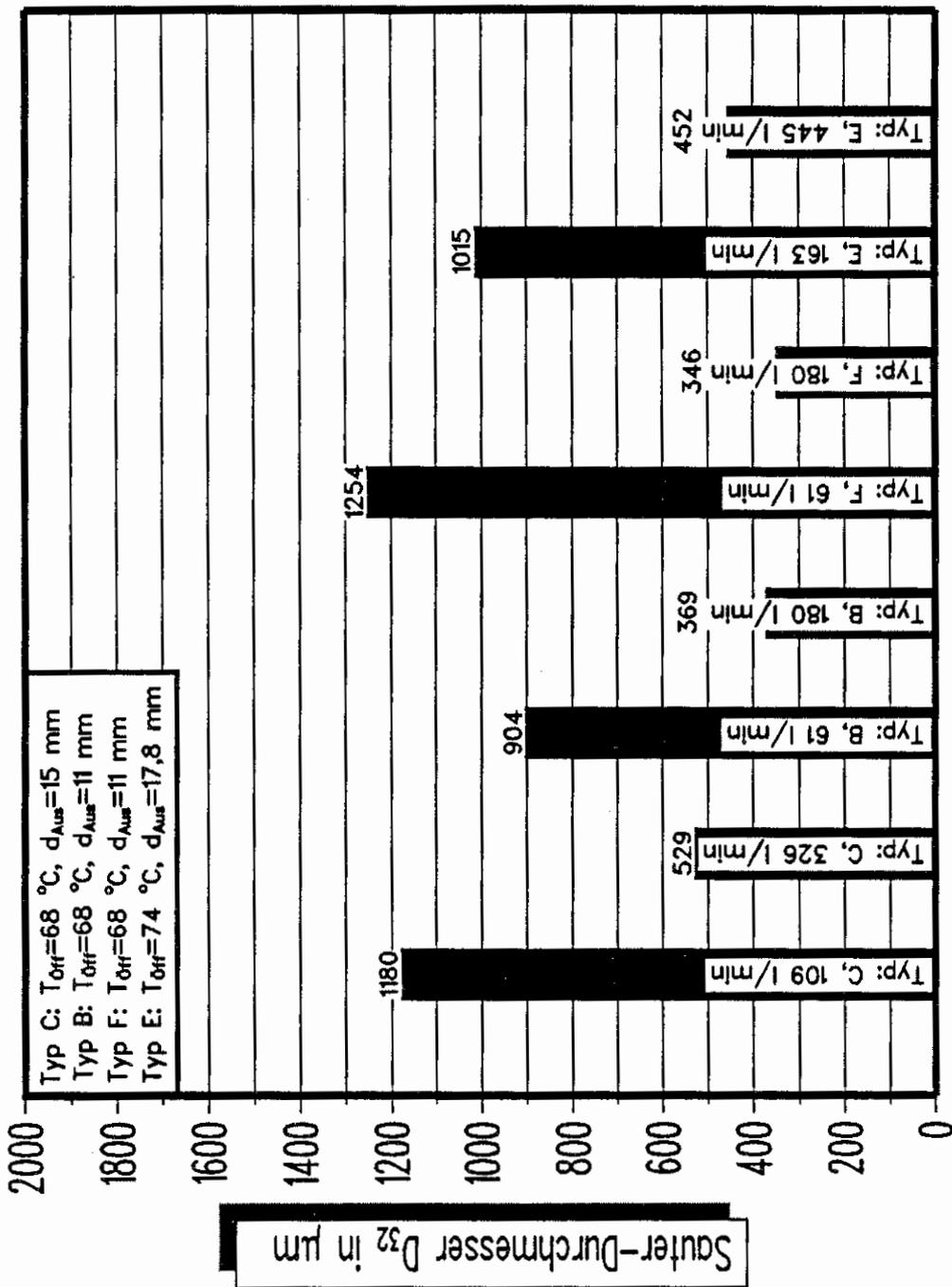


Bild 9 Über dem Sprühkegelradius gemittelter Sauter-Durchmesser von verschiedenen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler.

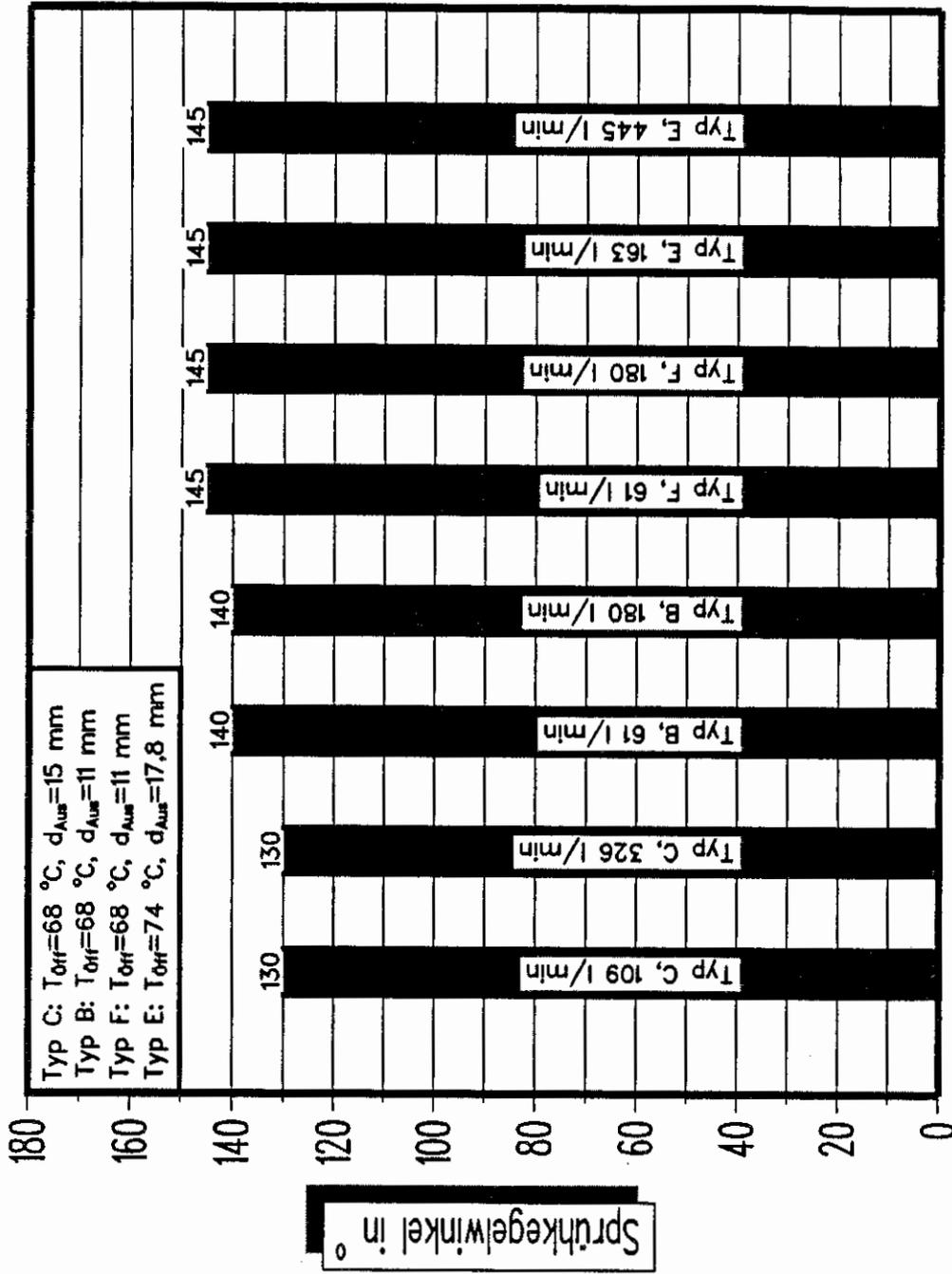


Bild 10 Sprühkegelwinkel von verschiedenen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler.

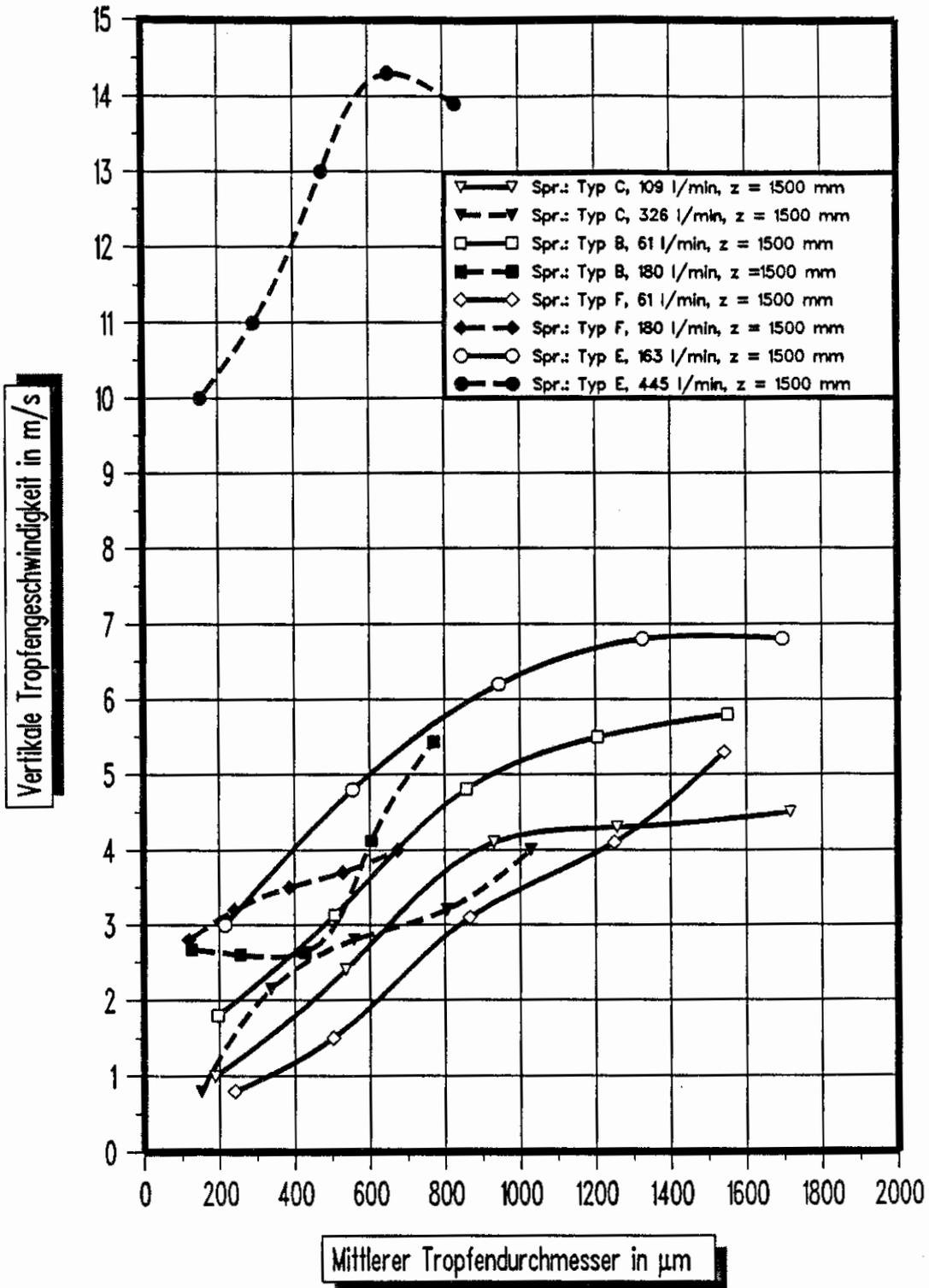


Bild 11 Mittlere vertikale Geschwindigkeiten der verschiedenen Tropfengrößen bei unterschiedlichen Sprinklertypen bei 2 verschiedenen Volumenströmen in einer Entfernung von 1,5 m vom Sprinkler.

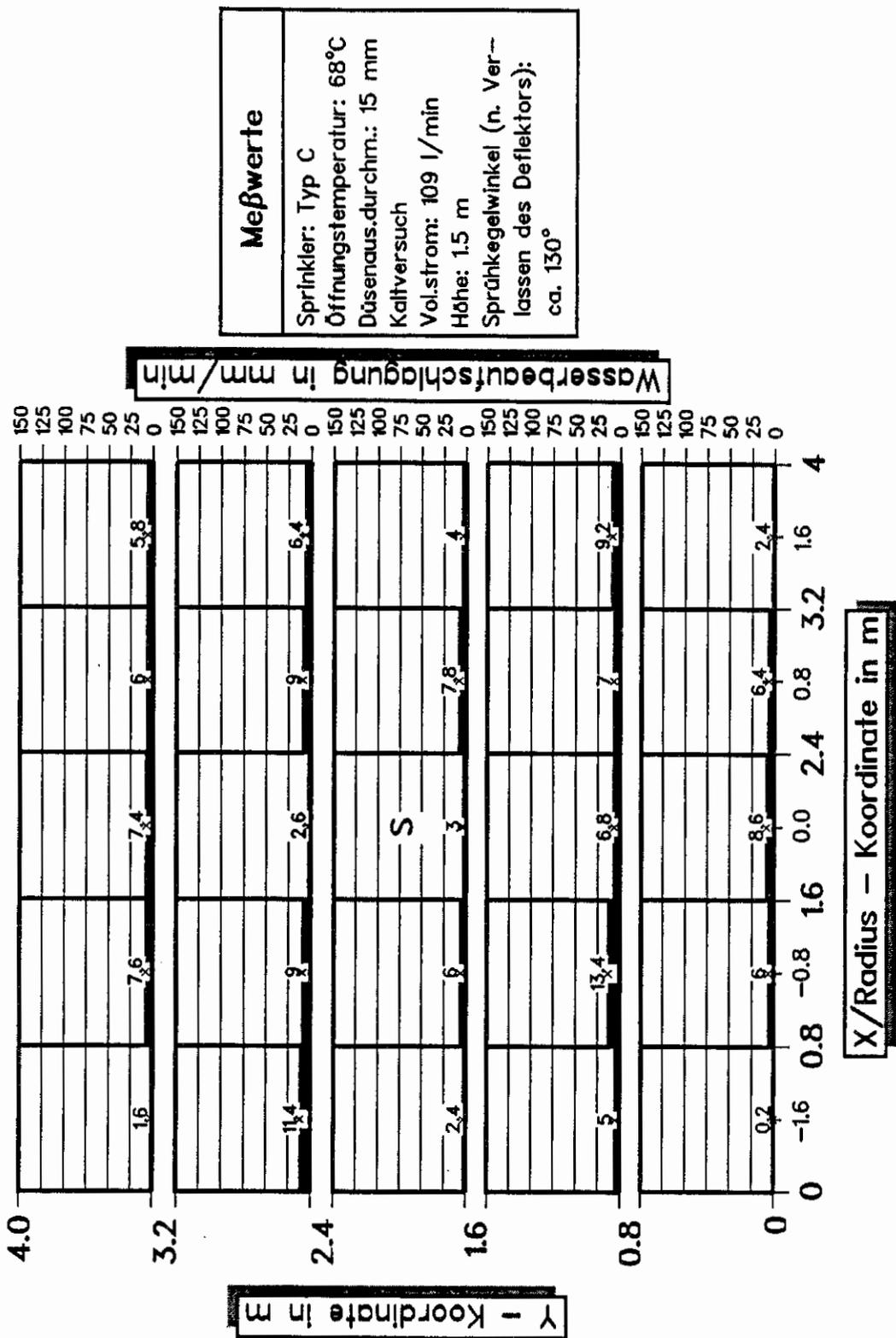


Bild 12.1 **Meßwerte** für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom **Typ C** bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von **109 l/min**.

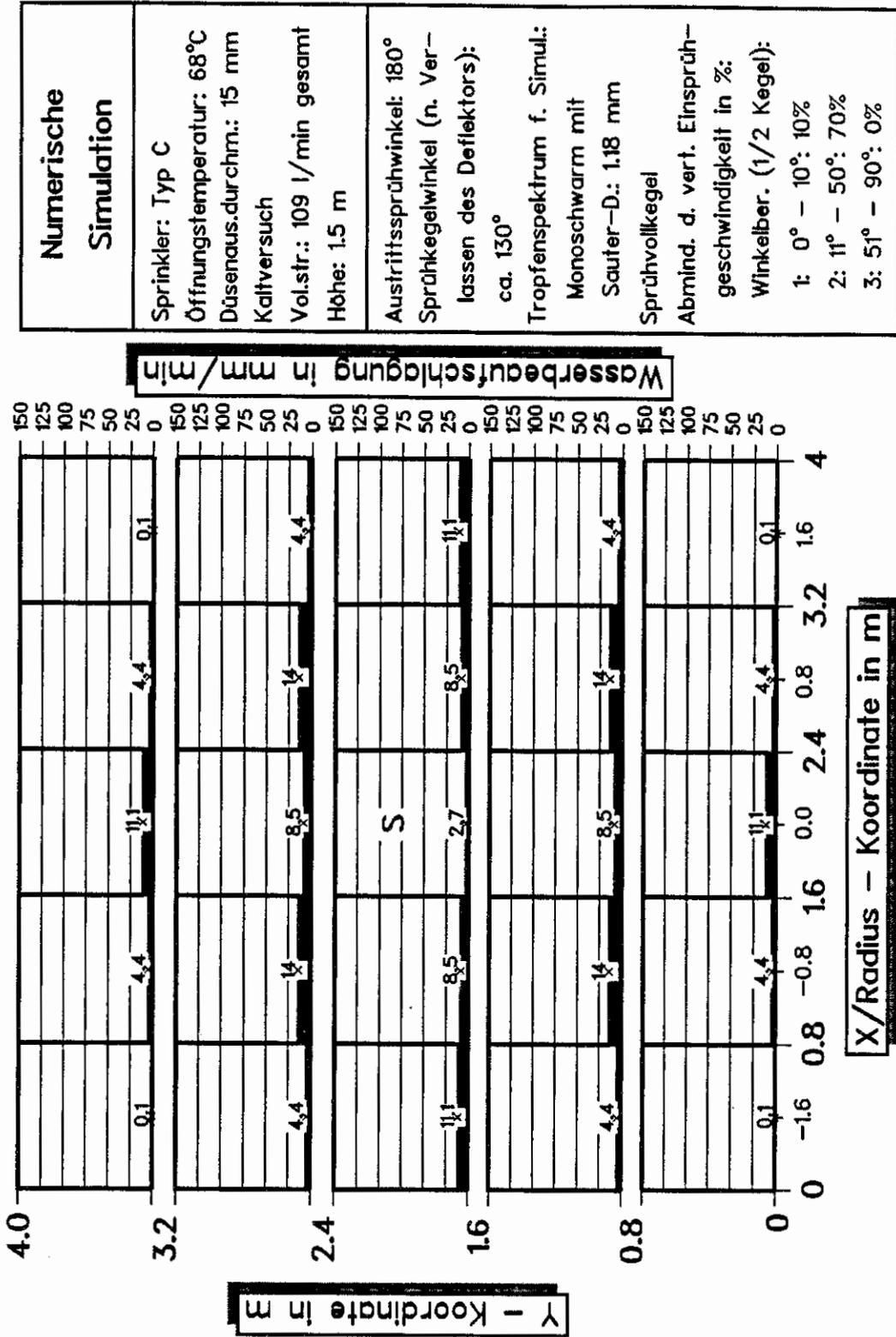


Bild 12.2 Berechnung der Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ C bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 109 l/min mit dem Sauter-Durchmesser (Monoschwarm).

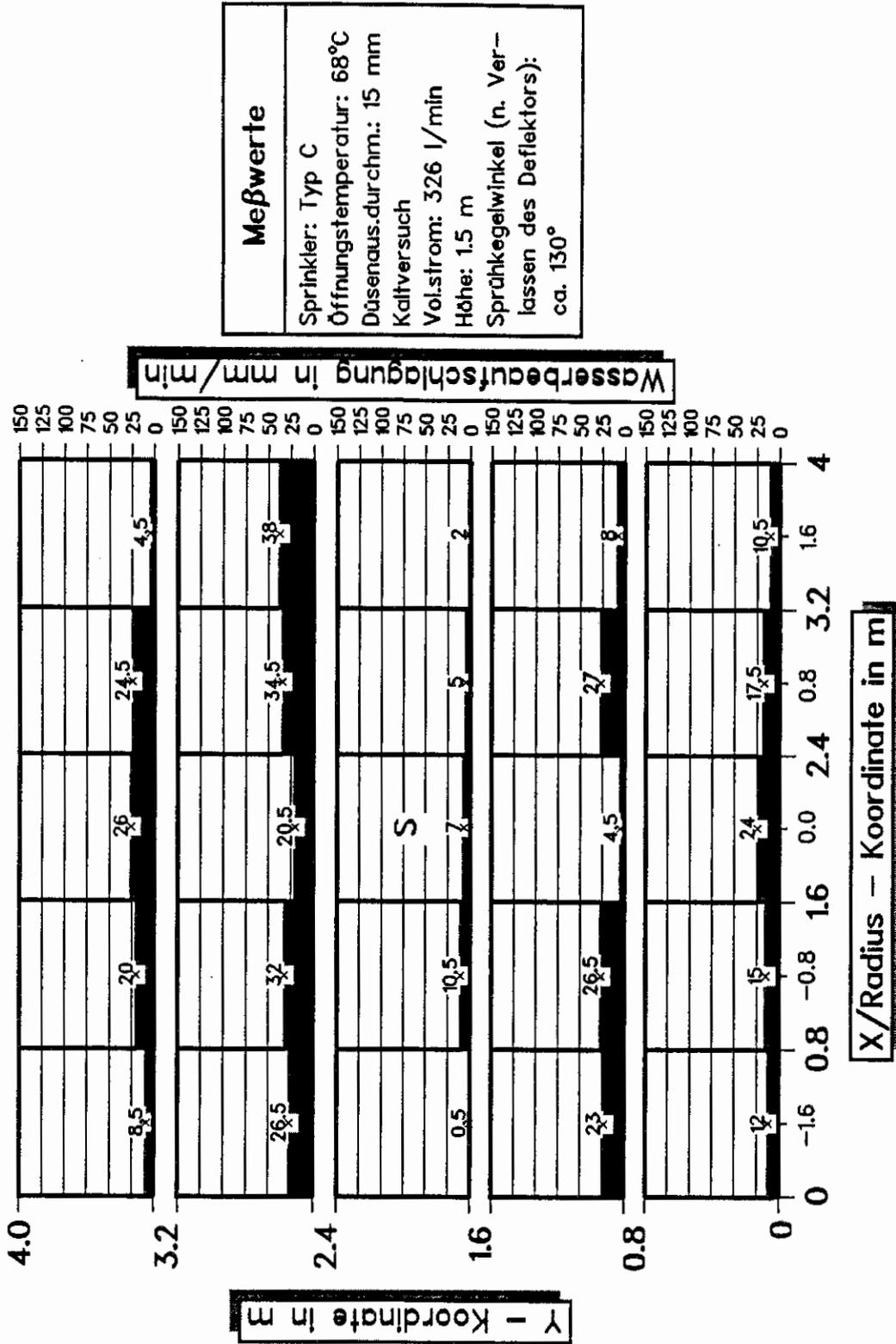


Bild 12.3 **Meßwerte** für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom **Typ C** bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 326 l/min.

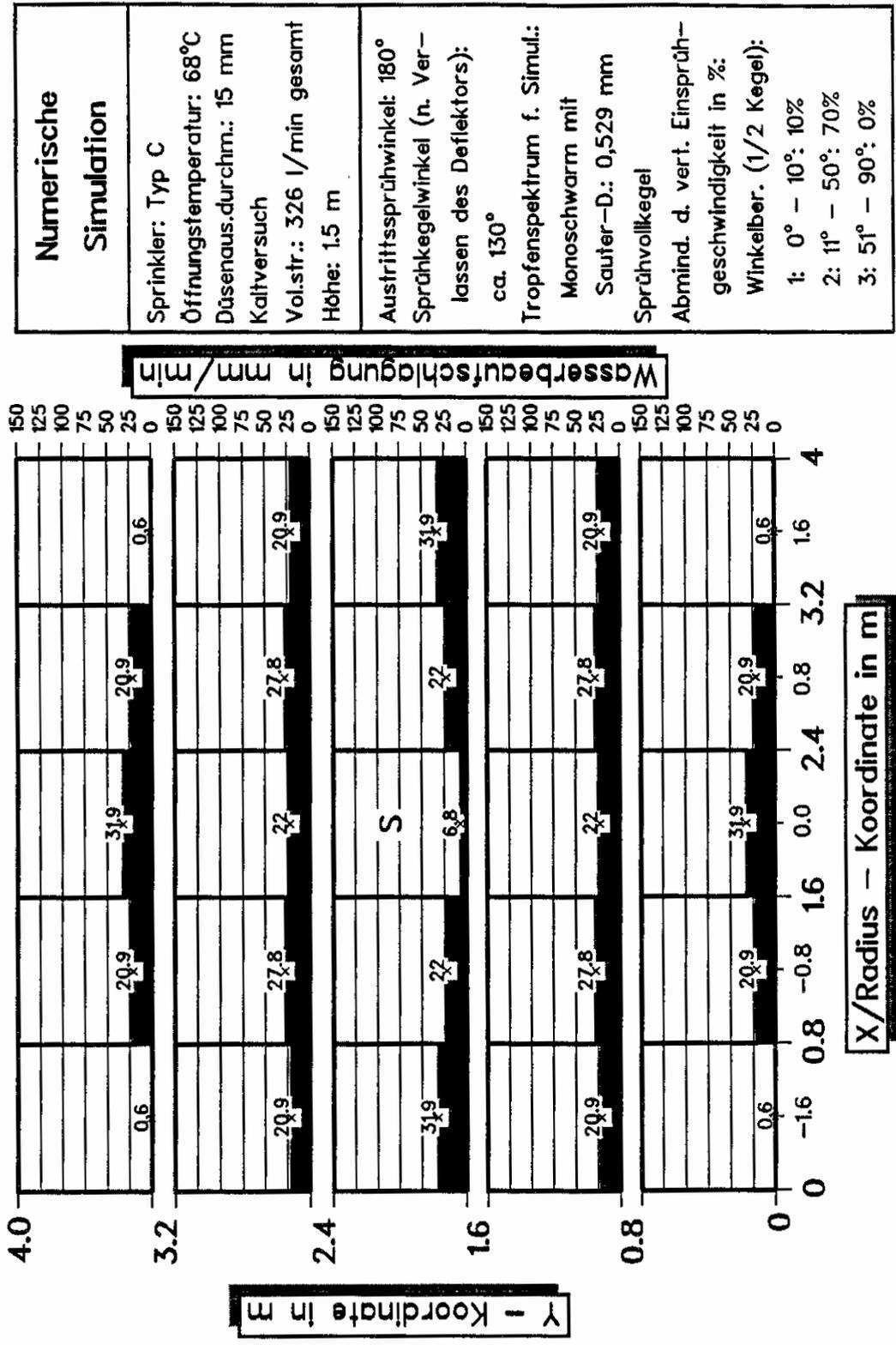


Bild 12.4 Berechnung der Wasserbeanspruchung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ C bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 326 l/min mit dem Sauter-Durchmesser (Monoschwarm).

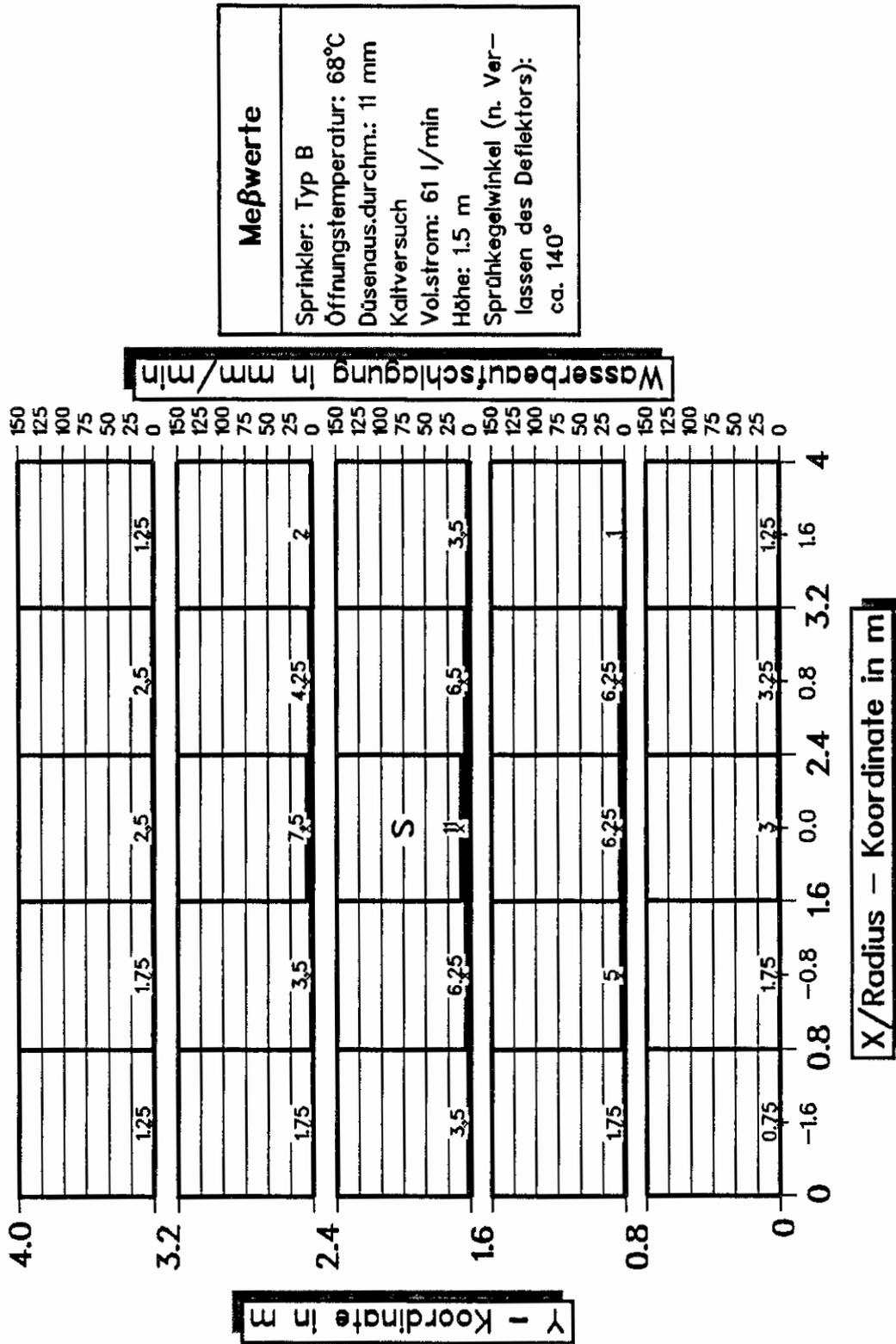
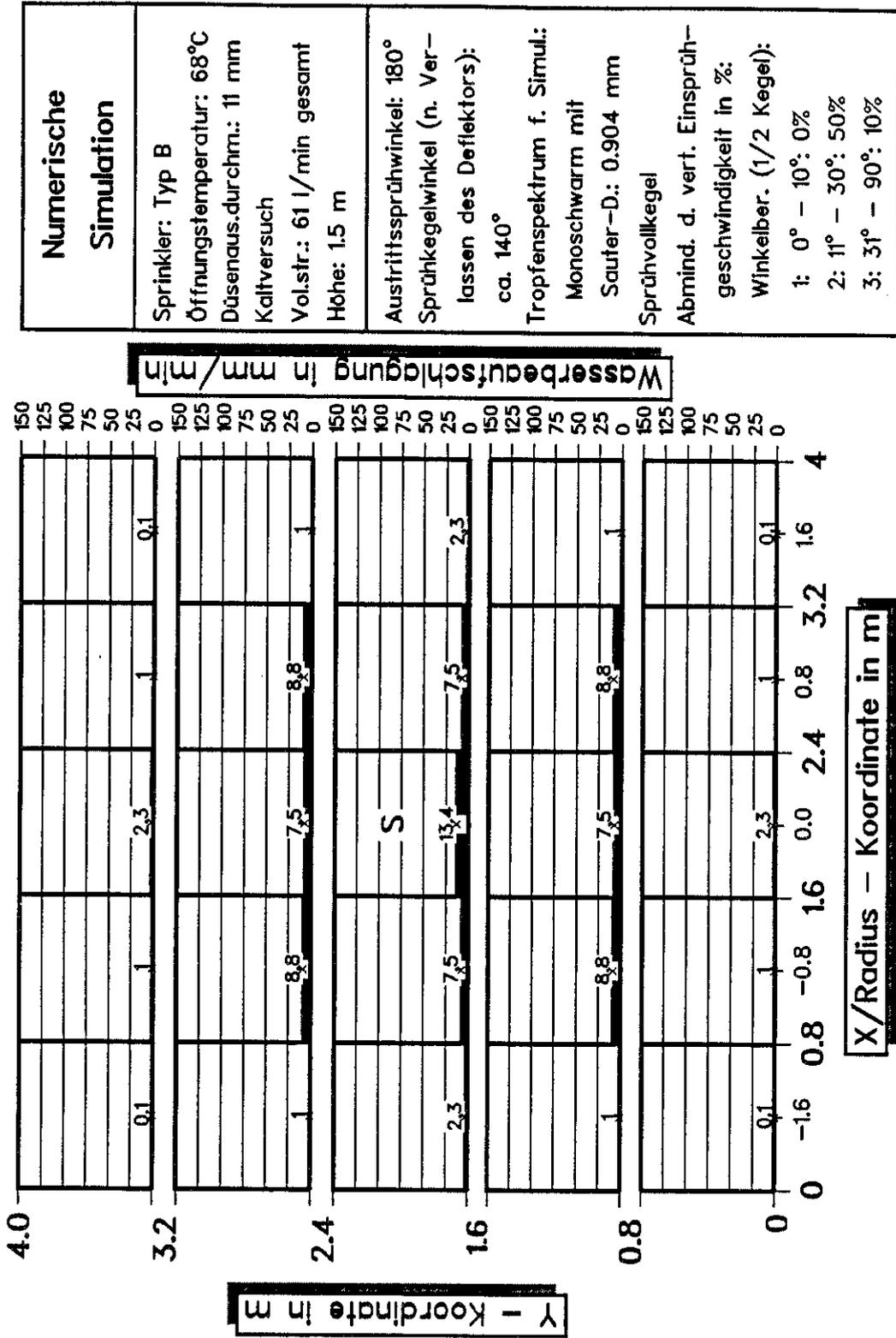


Bild 13.1 **Meßwerte** für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom **Typ B** bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 61 l/min.



Numerische Simulation	
Sprinkler: Typ B	
Öffnungstemperatur: 68°C	
Düsenaus.durchm.: 11 mm	
Kaltversuch	
Vol.str.: 61 l/min gesamt	
Höhe: 1.5 m	
Austrittsprühwinkel: 180°	
Sprühkegelwinkel (n. Verlassen des Deflektors): ca. 140°	
Tropfenspektrum f. Simul.: Monoschwarm mit Sauter-D.: 0.904 mm	
Sprühvollkegel	
Abmind. d. vert. Einsprühgeschwindigkeit in %:	
Winkelber. (1/2 Kegel):	
1: 0° - 10°: 0%	
2: 11° - 30°: 50%	
3: 31° - 90°: 10%	

Bild 13.2 Berechnung der Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ B bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 61 l/min mit dem Sauter-Durchmesser (Monoschwarm).

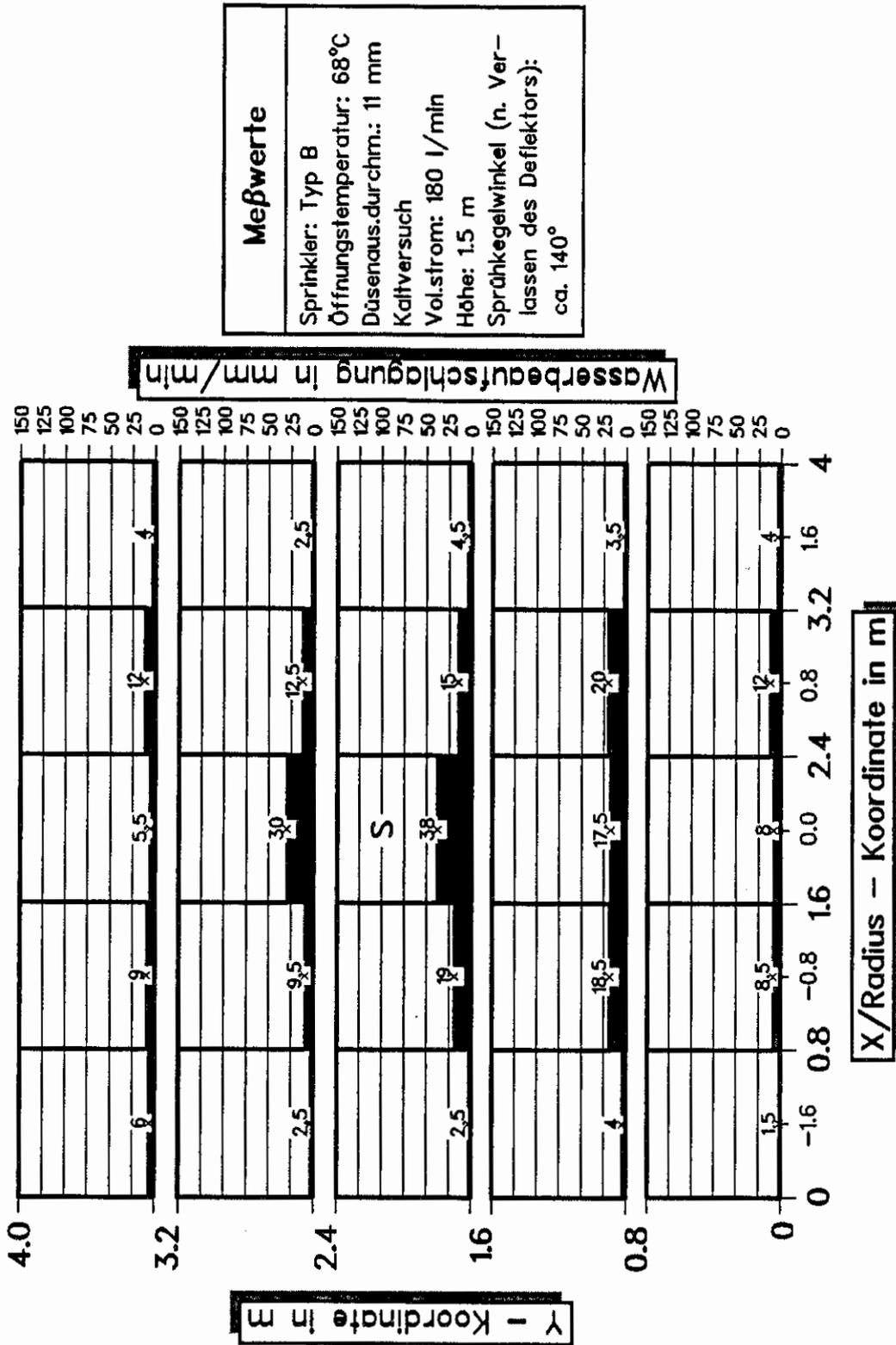


Bild 13.3 Meßwerte für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ B bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 180 l/min.

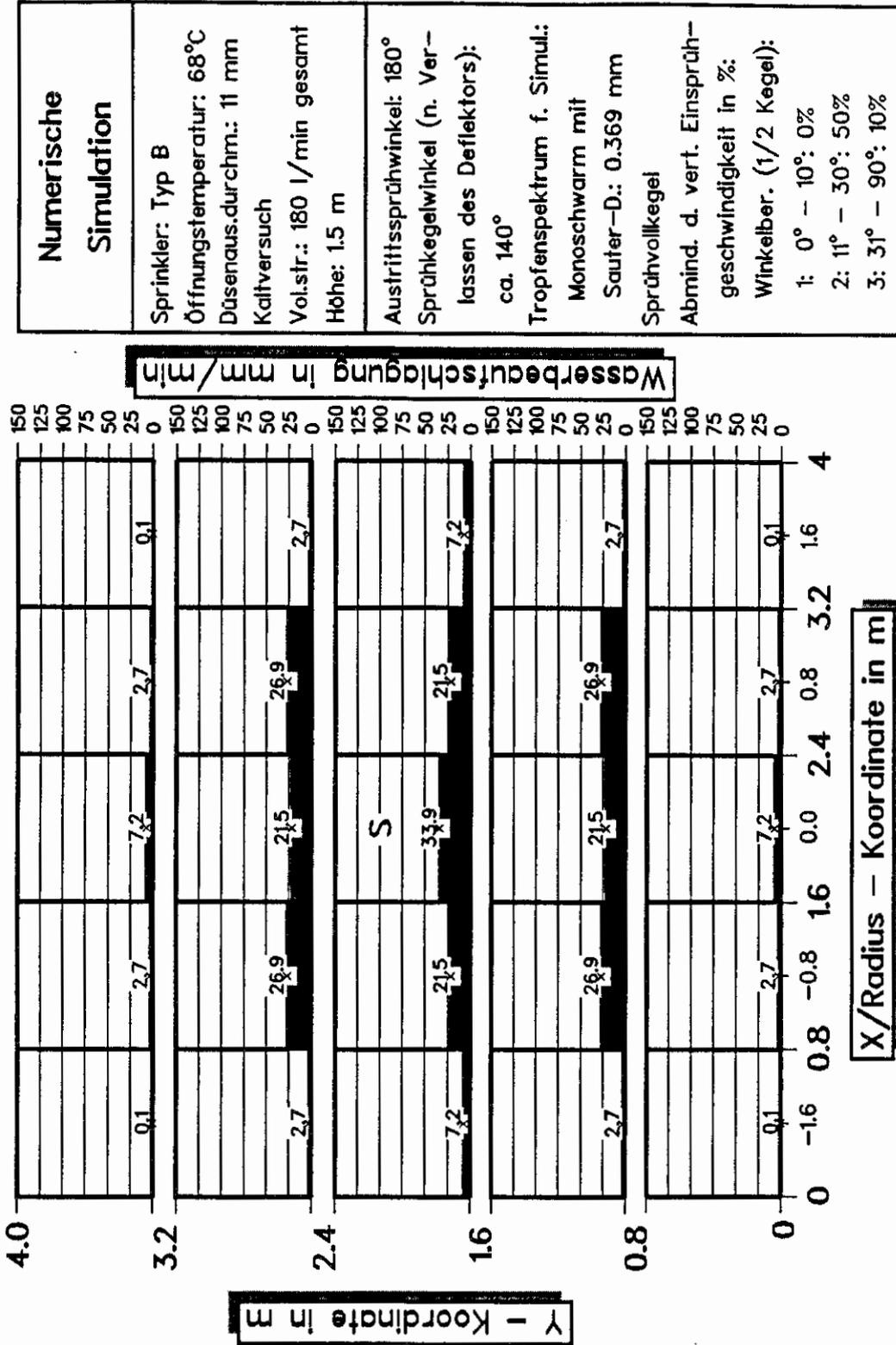


Bild 13.4 Berechnung der Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ B bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 180 l/min mit dem Sauter-Durchmesser (Monoschwarm).

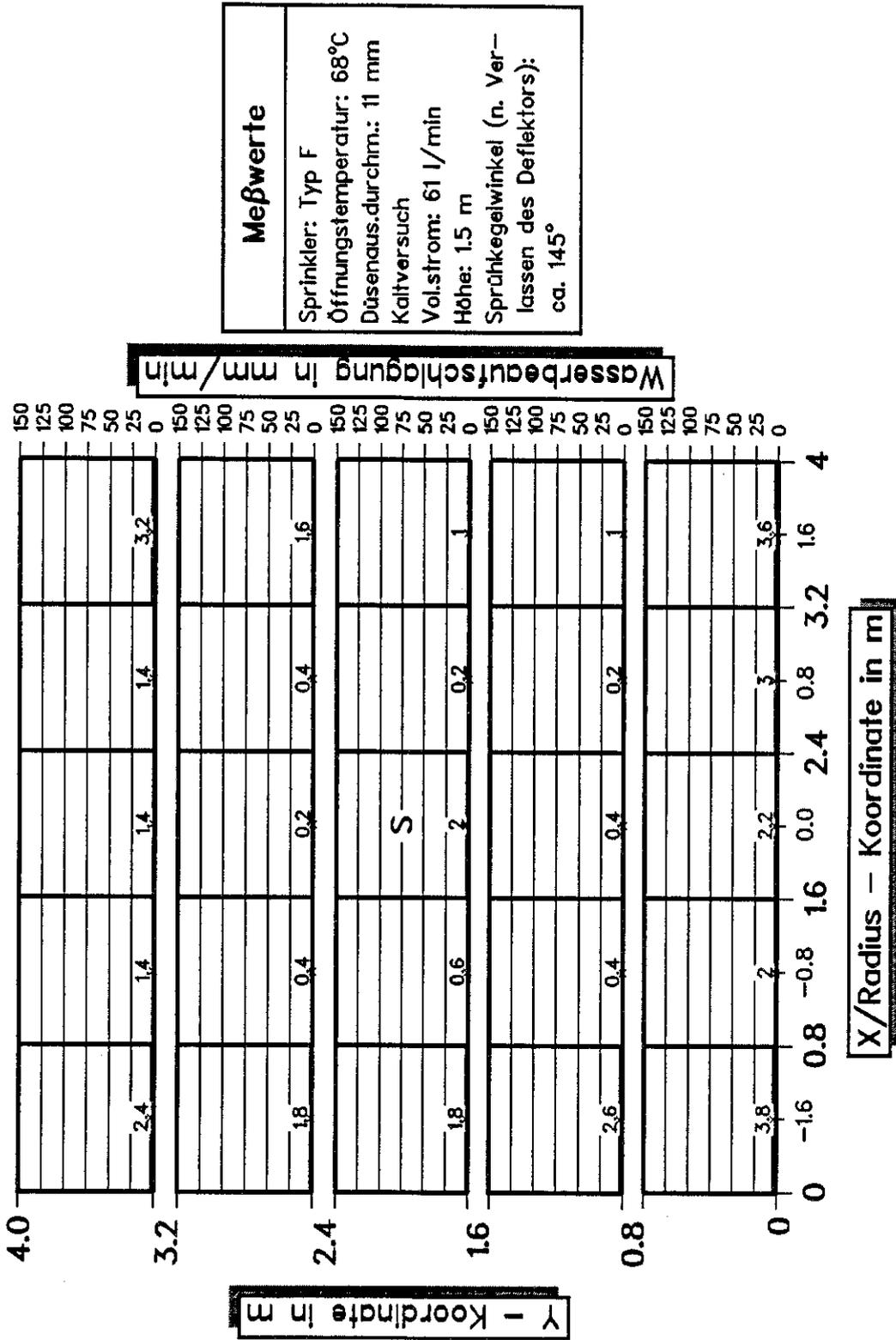


Bild 14.1 Meßwerte für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ F bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 61 l/min.

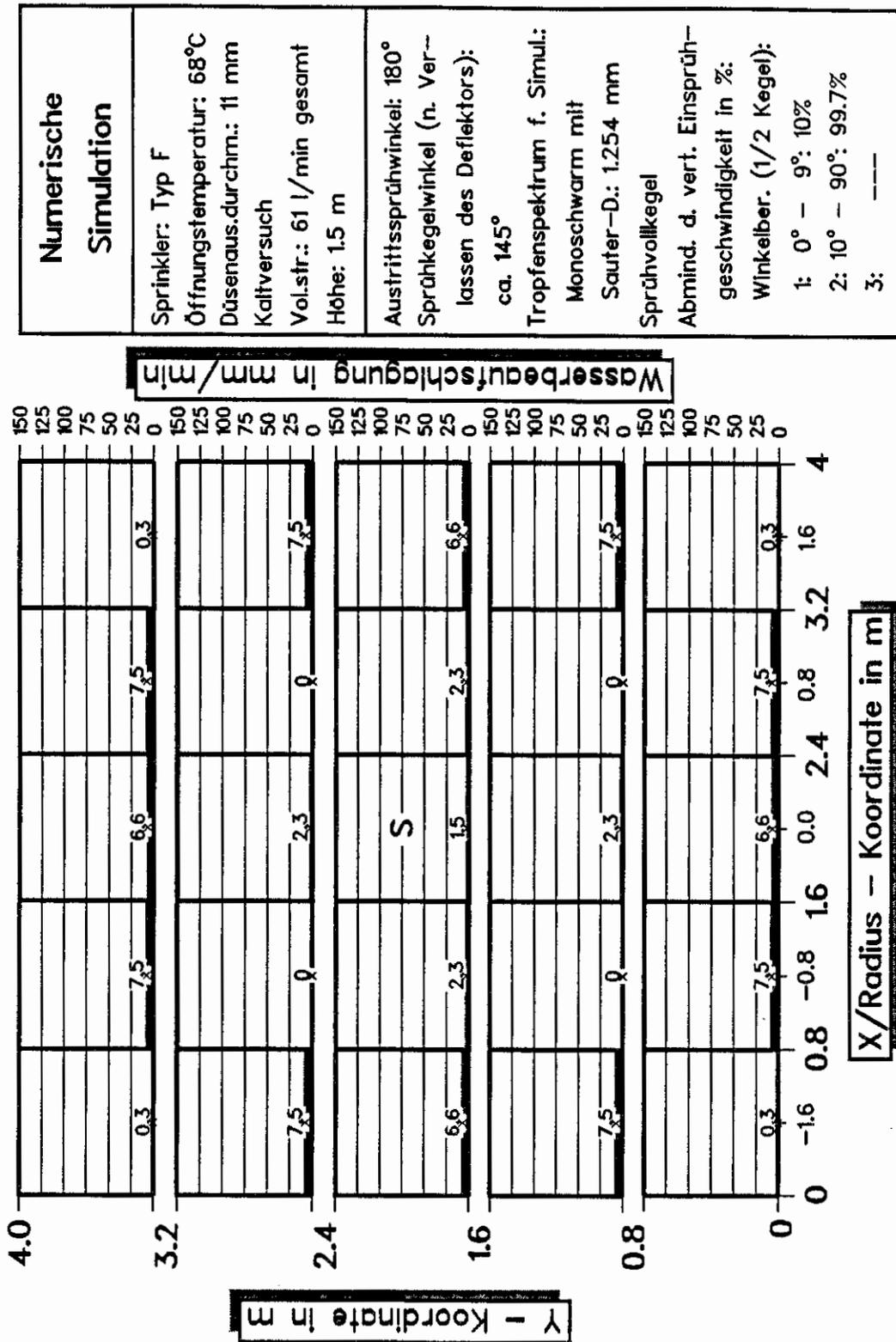


Bild 14.2 Berechnung der Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ F bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 61 l/min mit dem Sauter-Durchmesser (Monoschwarm).

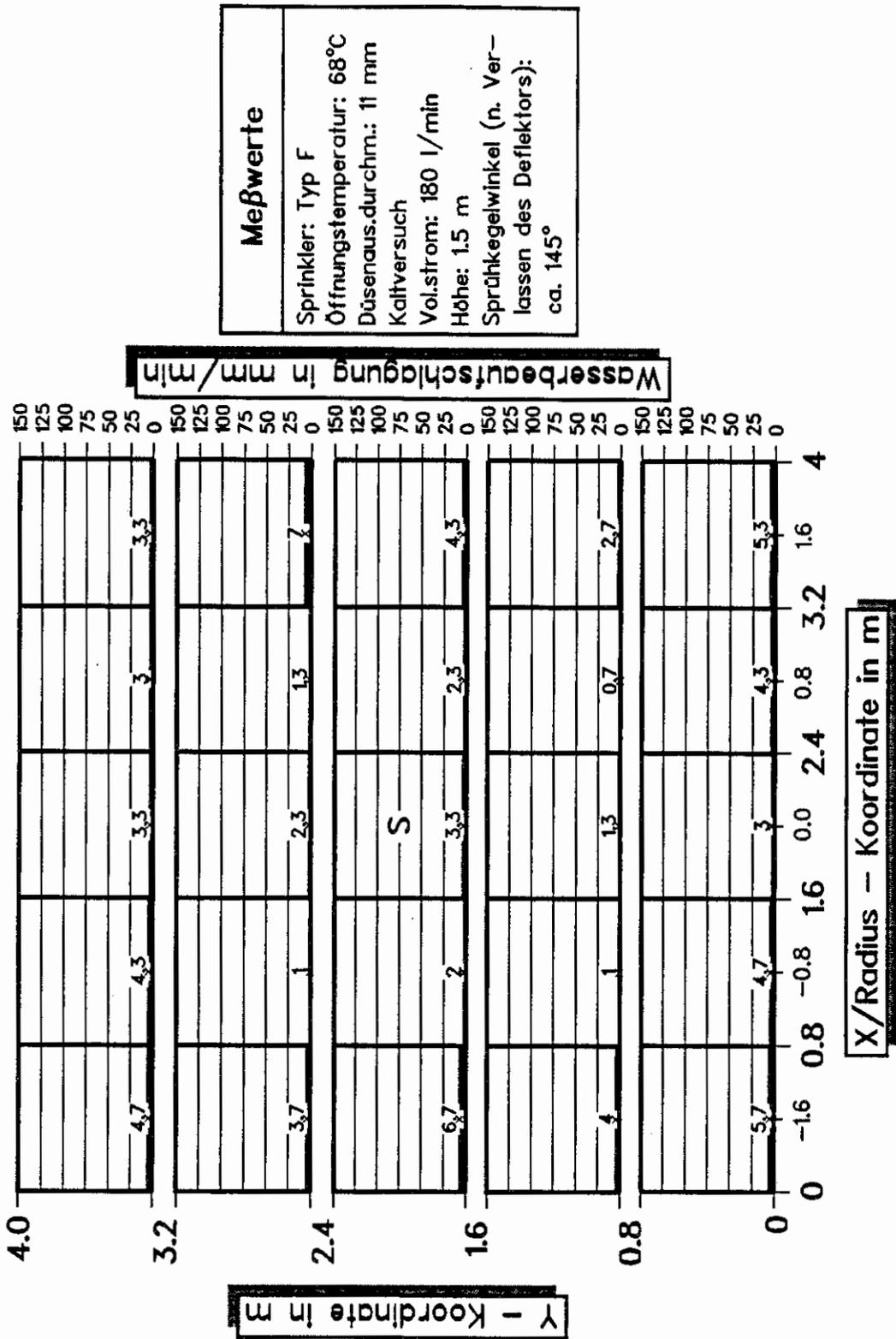


Bild 14.3 Meßwerte für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ F bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 180 l/min.

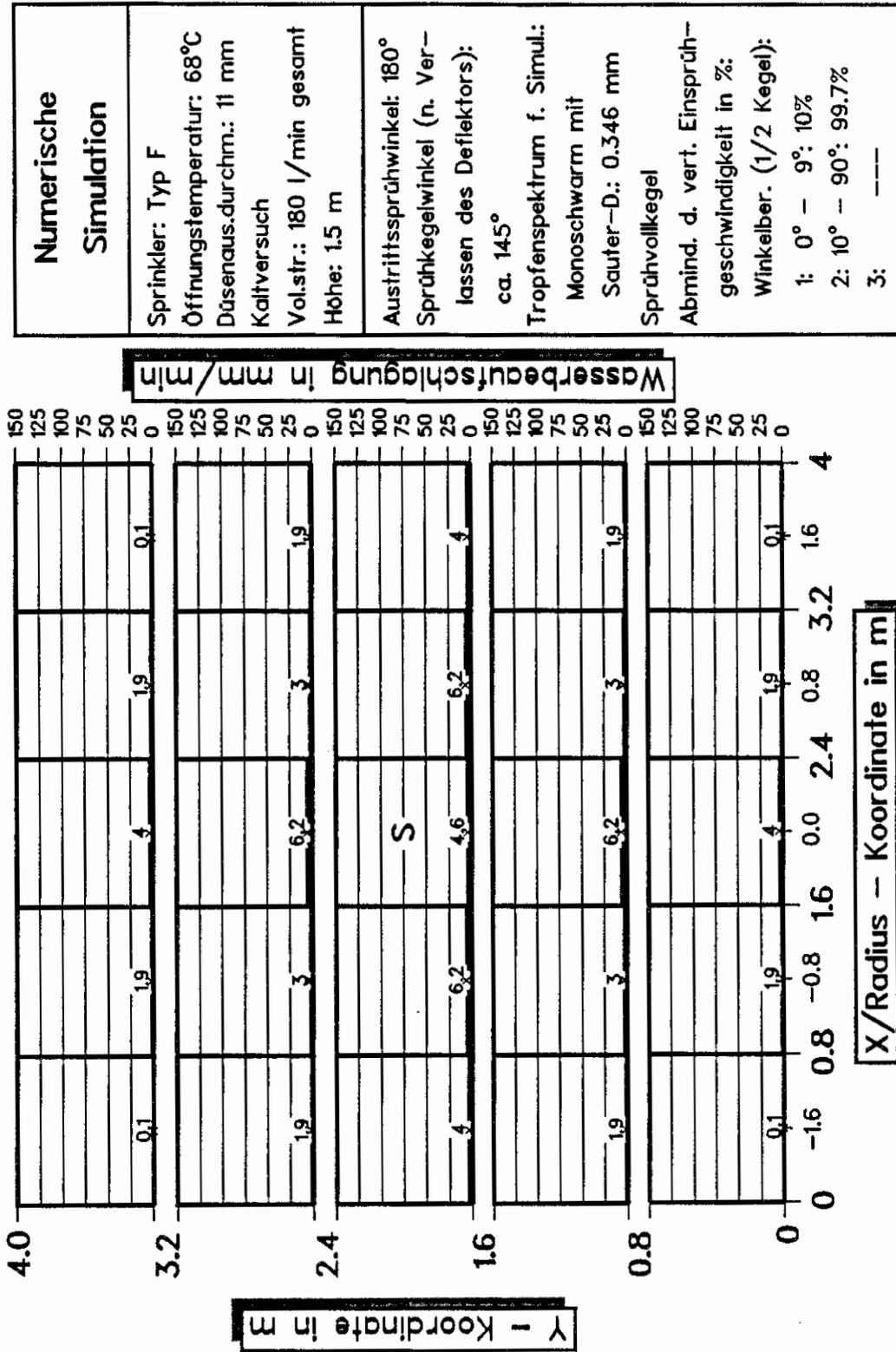
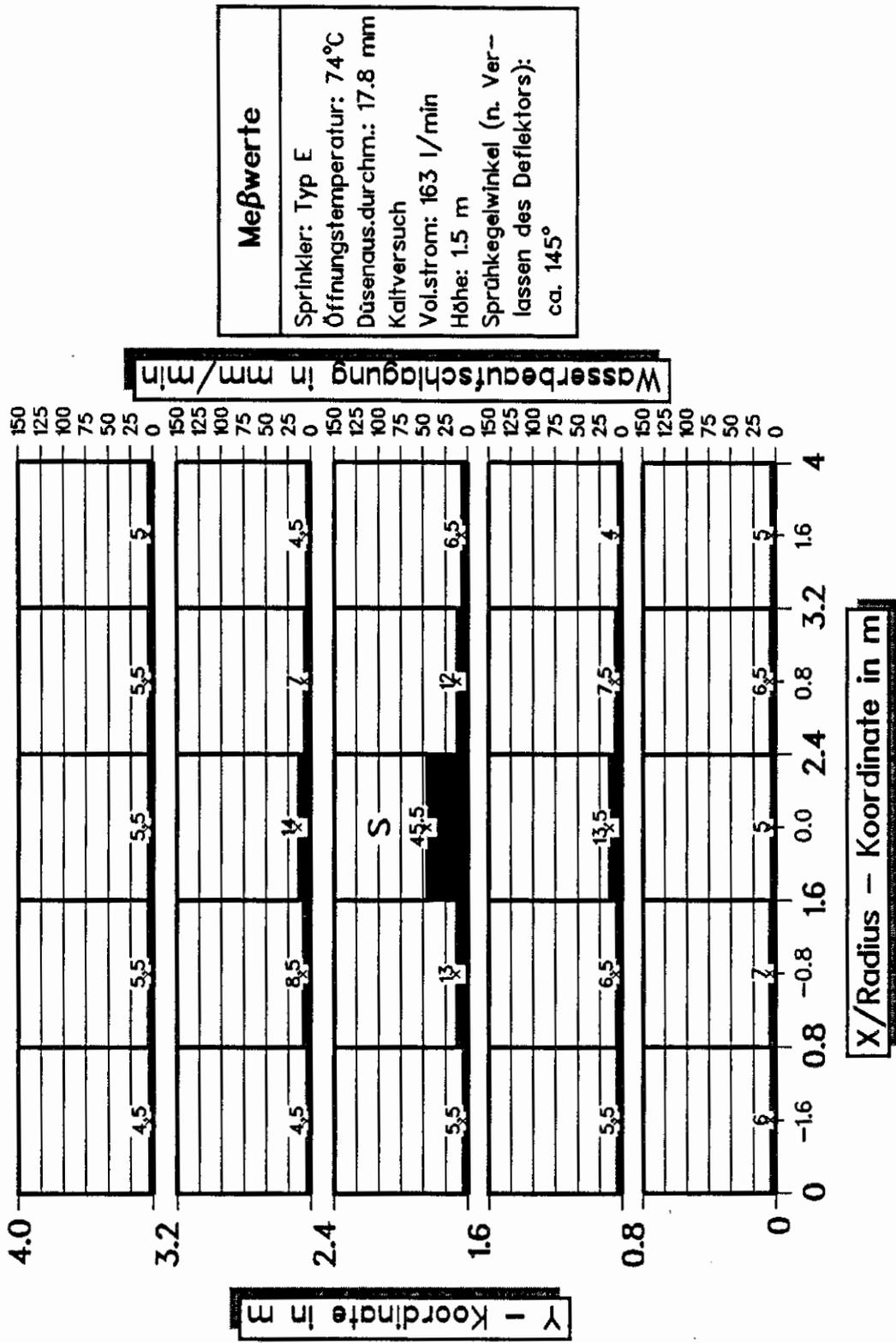


Bild 14.4 Berechnung der Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ F bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 180 l/min mit dem Sauter-Durchmesser (Monoschwarm).



Meßwerte
Sprinkler: Typ E
Öffnungstemperatur: 74°C
Düsenaus.durchm.: 17.8 mm
Kaltversuch
Vol.strom: 163 l/min
Höhe: 1.5 m
Sprühkegelwinkel (n. Verlassen des Deflektors): ca. 145°

Bild 15.1 Meßwerte für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ E bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 163 l/min.

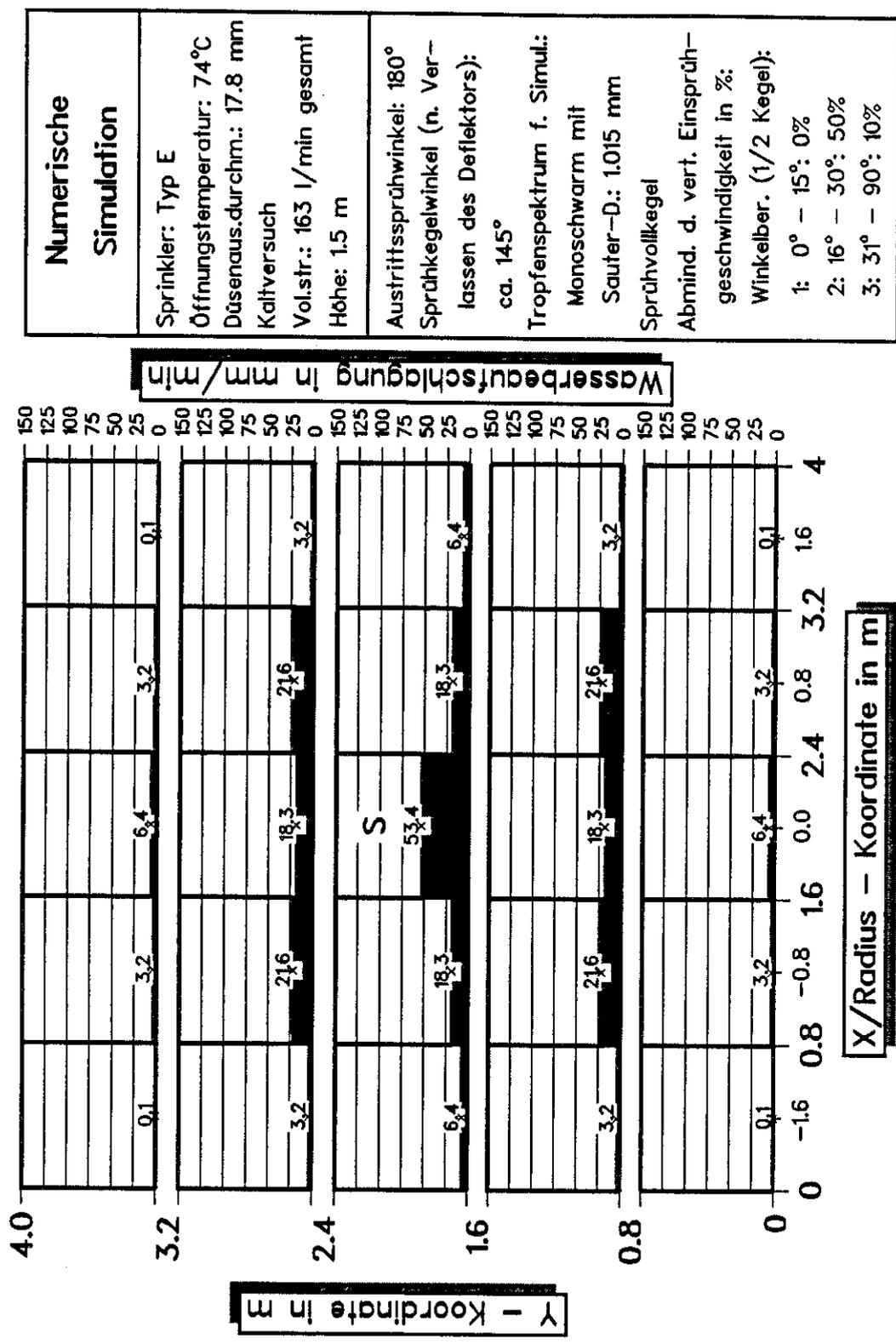
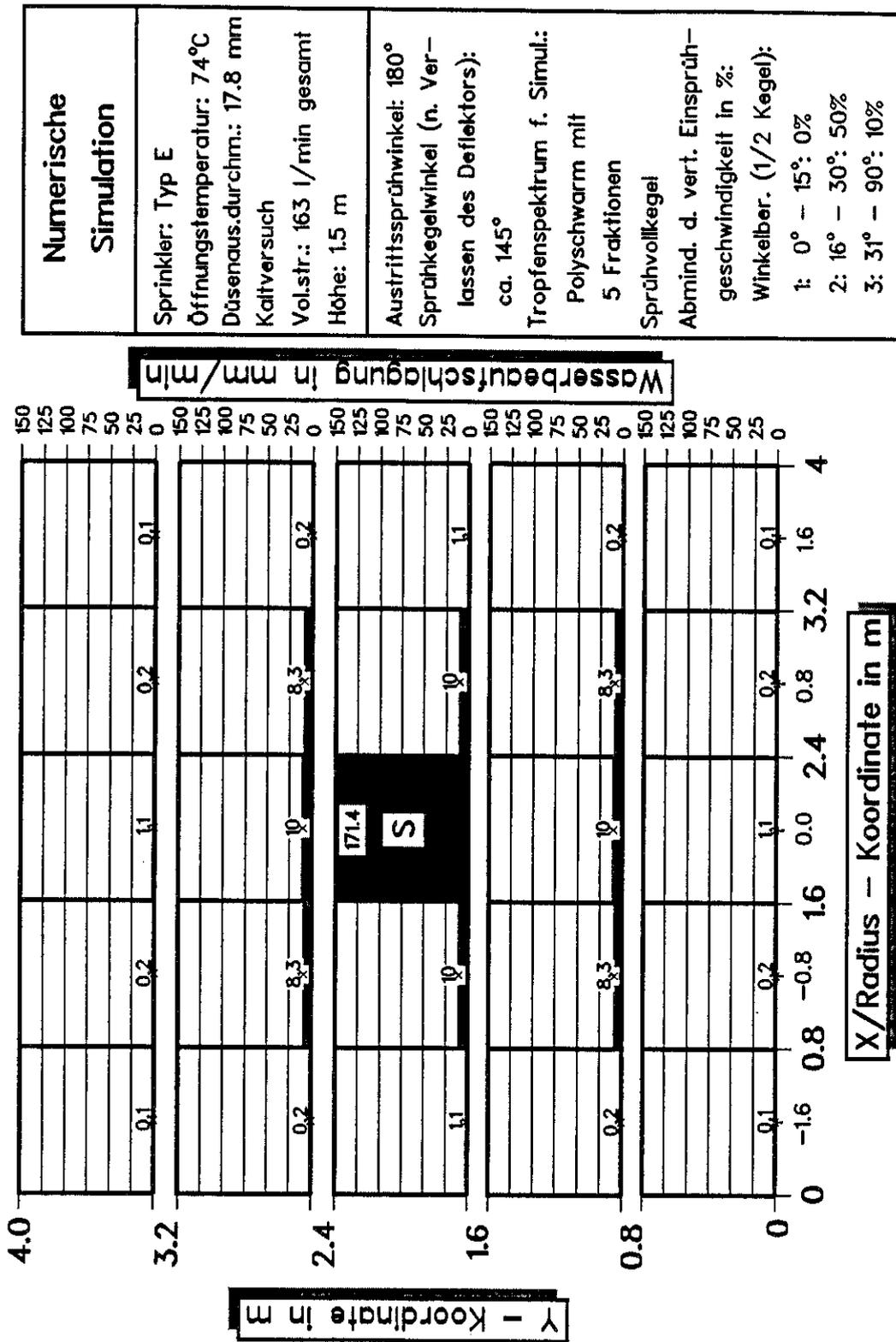
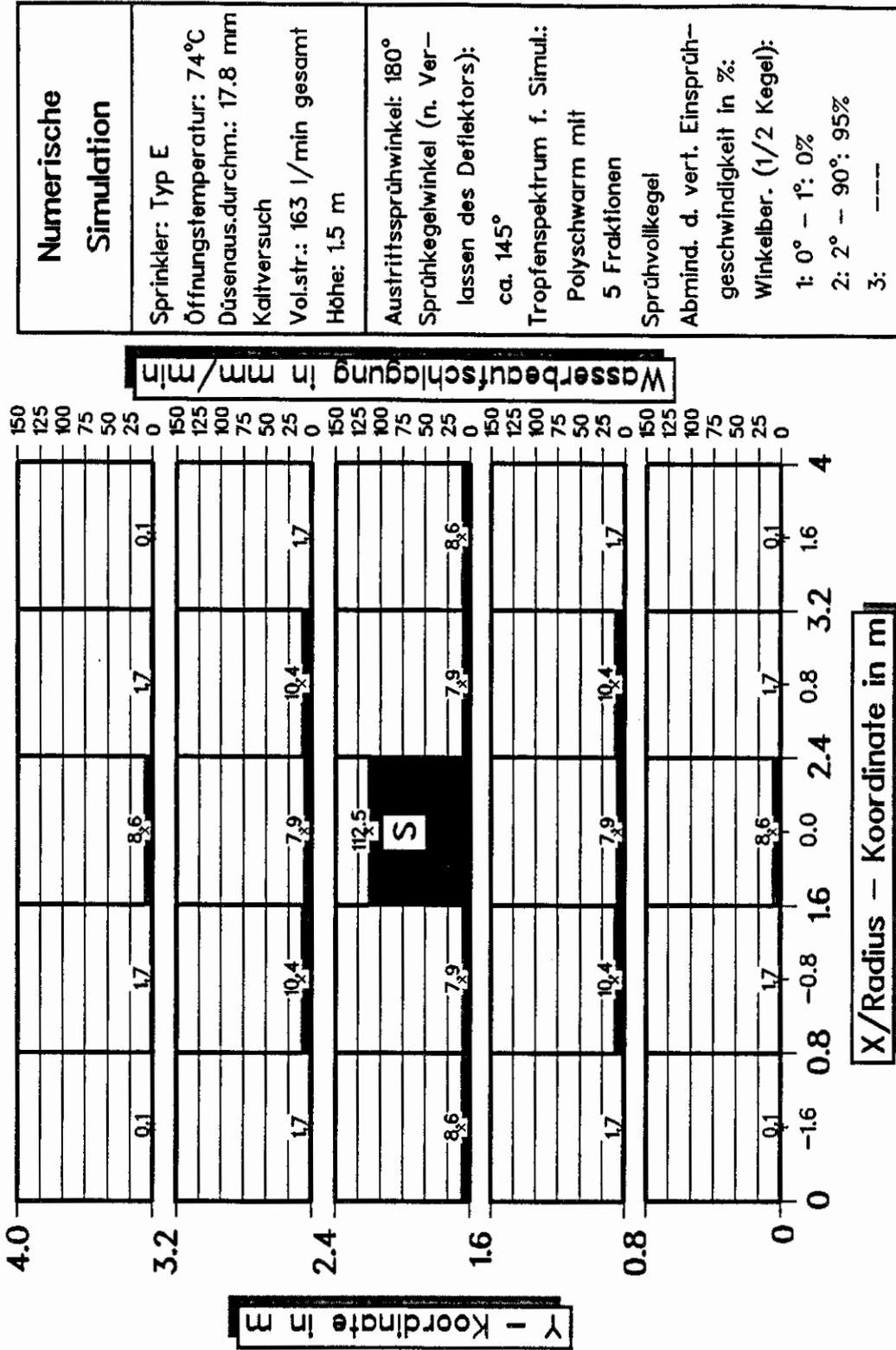


Bild 15.2 Berechnung der Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ E bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 163 l/min mit dem sauter-Durchmesser (Monoschwarm).



Numerische Simulation	
Sprinkler: Typ E	
Öffnungstemperatur: 74°C	
Düsenaus.durchm.: 17.8 mm	
Kaltversuch	
Vol.str.: 163 l/min gesamt	
Höhe: 1.5 m	
Austrittssprühwinkel: 180°	
Sprühkegelwinkel (n. Verlassen des Deflektors): ca. 145°	
Tropfenspektrum f. Simul.: Polyschwarm mit 5 Fraktionen	
Sprühvollkegel	
Abmind. d. vert. Einsprühgeschwindigkeit in %:	
Winkelber. (1/2 Kegel):	
1: 0° - 15°: 0%	
2: 16° - 30°: 50%	
3: 31° - 90°: 10%	

Bild 15.3 Berechnung der Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ E bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 163 l/min mit 5 Fraktionen (Polyschwarm, Fall I).



Numerische Simulation	
Sprinkler: Typ E	
Öffnungstemperatur: 74°C	
Dusenaus.durchm.: 17.8 mm	
Kaltversuch	
Vol.str.: 163 l/min gesamt	
Höhe: 1.5 m	
Austrittssprühwinkel: 180°	
Sprühkegelwinkel (n. Verlassen des Deflektors): ca. 145°	
Tropfenspektrum f. Simul.: Polyschwarm mit 5 Fraktionen	
Sprühvollkegel	
Abmind. d. vert. Einsprühgeschwindigkeit in %:	
Winkelber. (1/2 Kegel):	
1: 0° - 1°: 0%	
2: 2° - 90°: 95%	
3: ---	

Bild 15.4 Berechnung der Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ E bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 163 l/min mit 5 Fraktionen (Polyschwarm, Fall II).

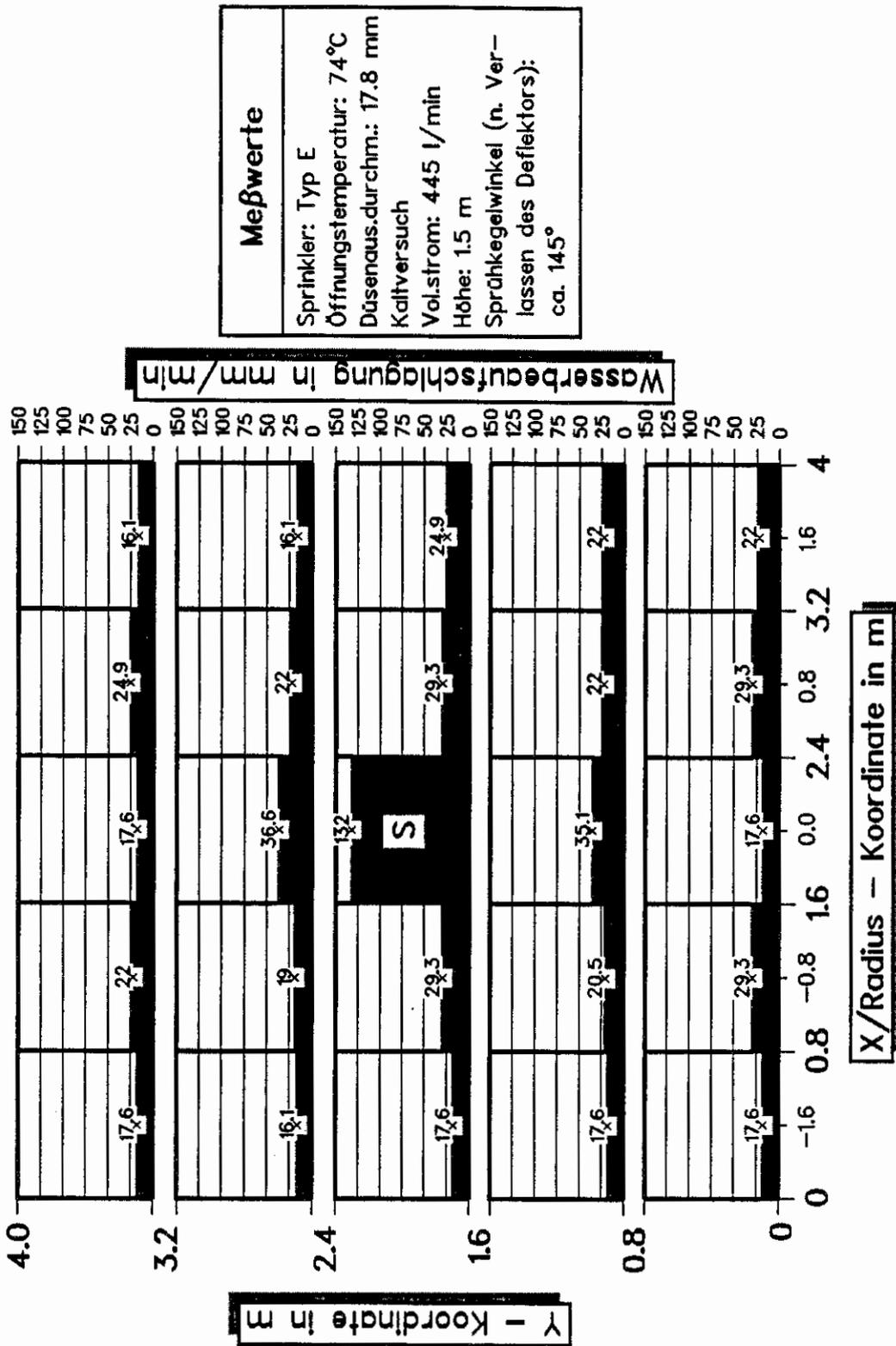


Bild 15.5 Meßwerte für die Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ E bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 445 l/min.

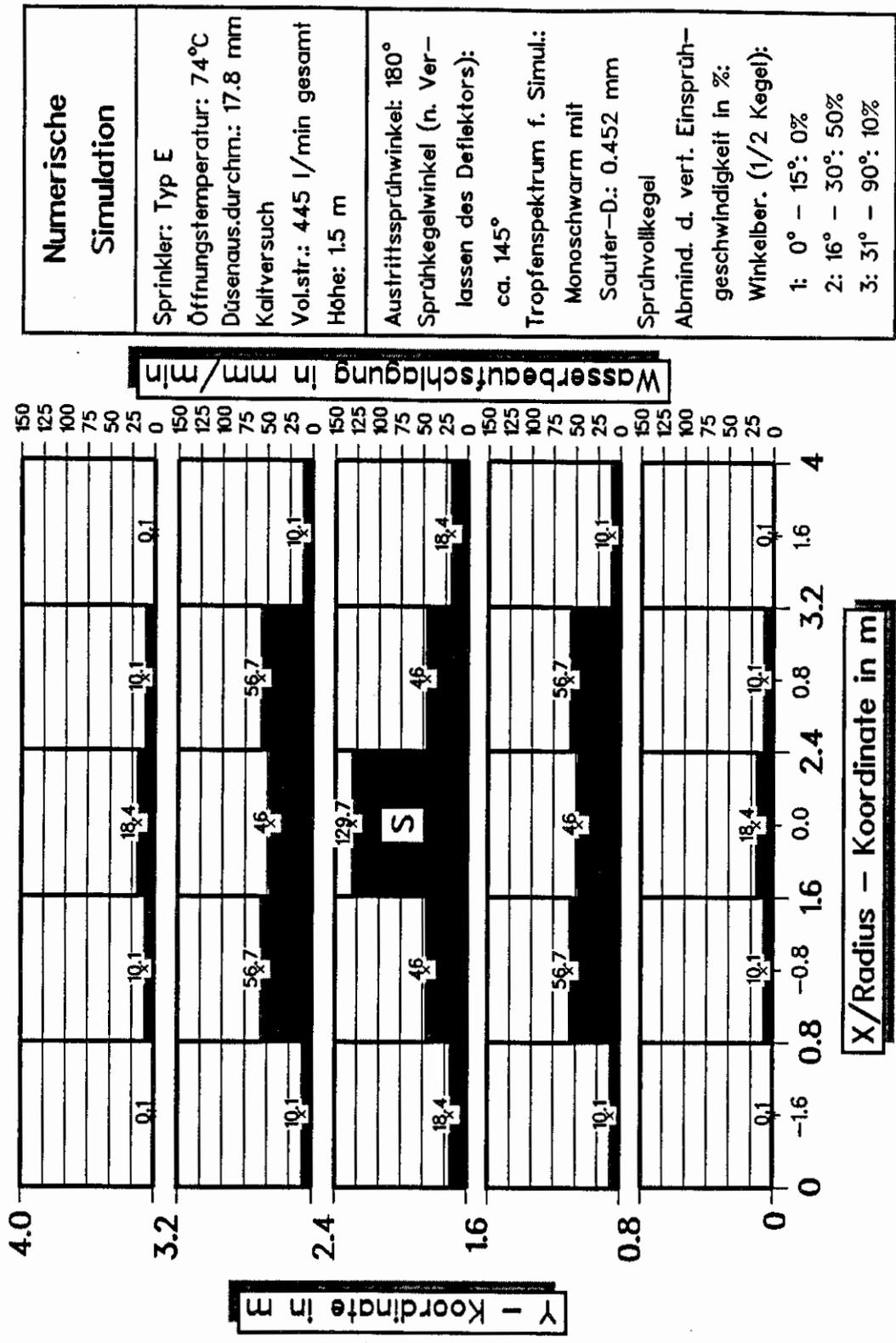


Bild 15.6 Berechnung der Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ E bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 445 l/min mit dem Sauter-Durchmesser (Monoschwarm).

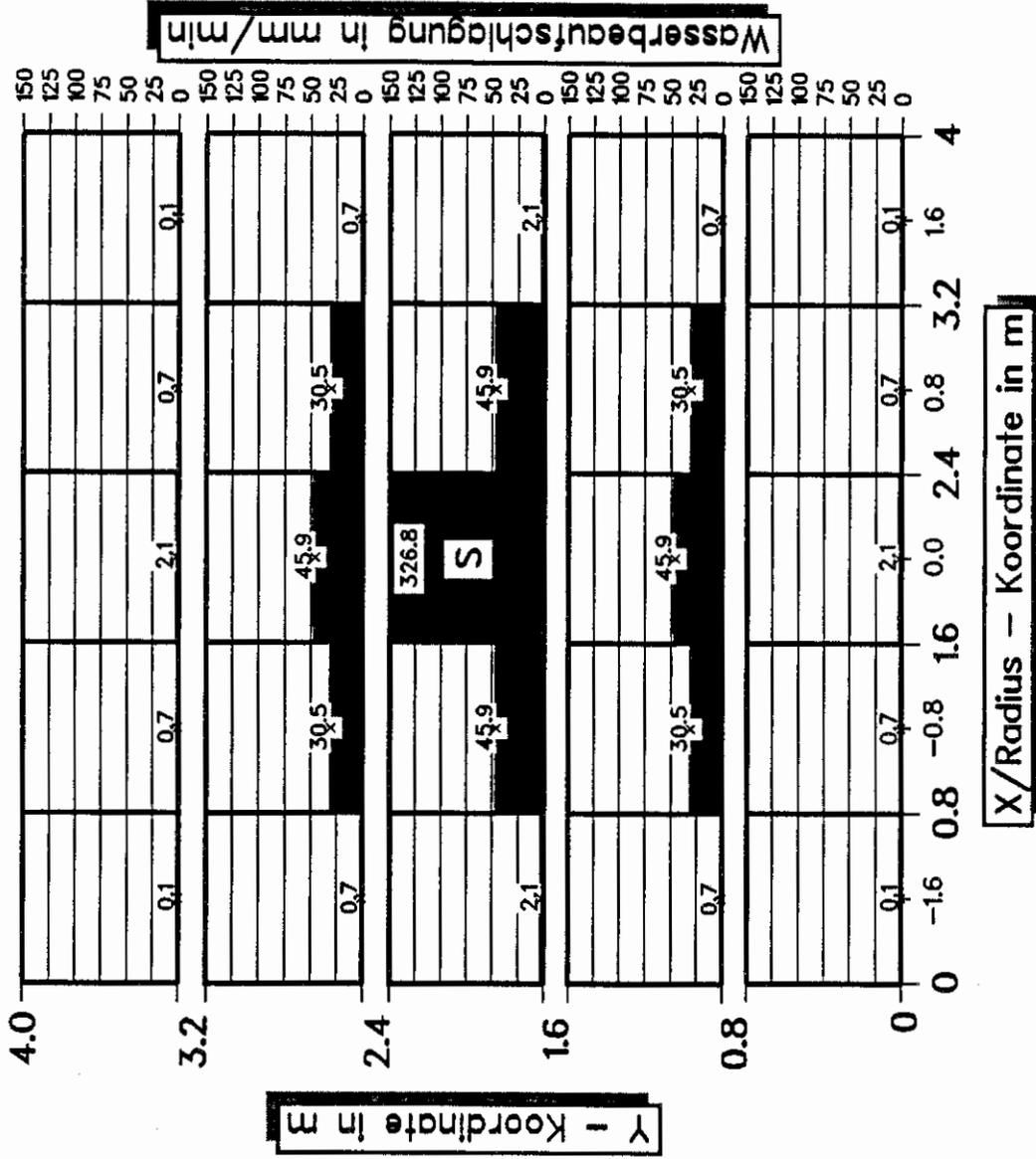
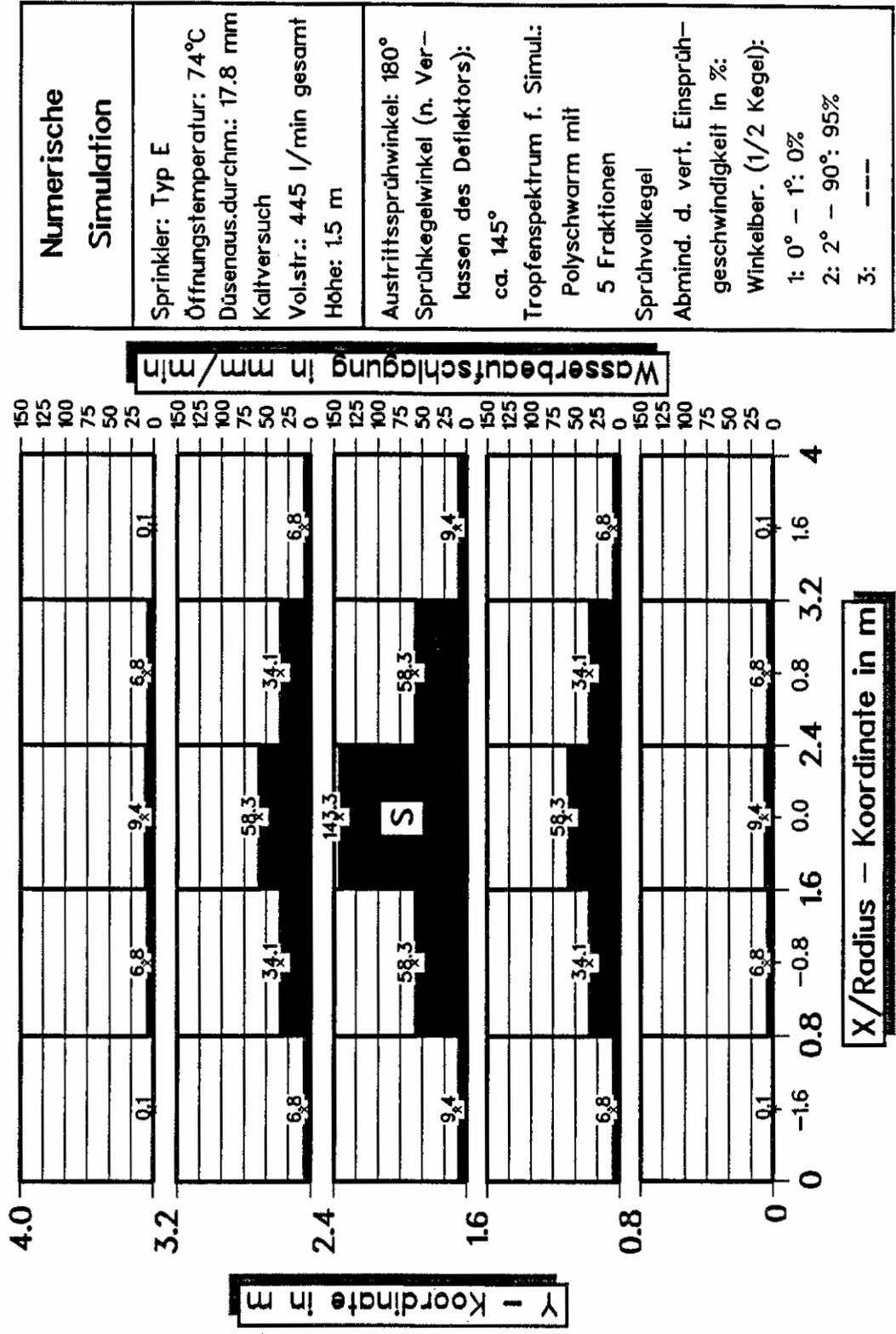


Bild 15.7 Berechnung der Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ E bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 445 l/min mit 5 Fraktionen (Polyschwarm, Fall I).



Numerische Simulation	
Sprinkler: Typ E	
Öffnungstemperatur: 74°C	
Düsenaus.durchm.: 17.8 mm	
Kaltversuch	
Vol.str.: 445 l/min gesamt	
Höhe: 1.5 m	
Austrittssprühwinkel: 180°	
Sprühkegelwinkel (n. Verlassen des Deflektors): ca. 145°	
Tropfenspektrum f. Simul.: Polyschwarm mit 5 Fraktionen	
Sprühvollkegel	
Abmind. d. vert. Einsprühgeschwindigkeit in %:	
Winkelber. (1/2 Kegel):	
1: 0° - 1°: 0%	
2: 2° - 90°: 95%	
3: ---	

Bild 15.8. Berechnung der Wasserbeaufschlagung von 25 Auffangwannen bei einem Sprinkler vom Typ E bei einer Sprinklerhöhe von 1,5 m und einem Volumenstrom von 445 l/min mit 5 Fraktionen (Polyschwarm, Fall II).