

HANS JOACHIM GERHARDT
GERD JUNG
GEORG SCHMIDT

Rauchversuch in einem Hochregallager

Die aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche für den Rauchabzug in Hochregallagern und ihr Einfluss auf die Löscharbeiten der Feuerwehr

1 Einleitung

In der VDI-Richtlinie 3564 »Empfehlung für den Brandschutz in Hochregallagern« sind die Richtlinien für Brandschutzmaßnahmen in Hochregallagern zusammengefasst. Sie macht unter anderem Angaben über das Verhältnis der aerodynamisch wirksamen Öffnungsfläche von natürlichen Rauchabzügen zur Grundfläche des betreffenden Brandabschnitts im Hochregallager. Dieses Verhältnis wird als prozentualer Anteil der Öffnungsfläche an der Grundfläche angegeben. Im Rahmen der Überarbeitung der VDI-Richtlinie wurde im zuständigen Ausschuss des VDI der Vorschlag gemacht, den bisher gültigen Wert von 3 % Öffnungsfläche auf 0,5 % zu reduzieren. Das würde bedeuten, dass Hochregallager (HRL) in Zukunft mit Öffnungsflächen für NRA ausgestattet werden könnten, die um den Faktor 6 kleiner sind als bisher. Um die Auswirkungen dieser reduzierten Öffnungsflächen auf die Rauchausbildung im Brandfall zu überprüfen, initiierten Mitglieder des Normenausschusses der DIN 18232 Rauchversuche an einem realen Objekt.

Die Rauchversuche wurden am 9. Juni 2001 in einem HRL der Aachener Firma Grünenthal durchgeführt. Als Beobachter und Ausführende haben u. a. teilgenommen: Thomas Winkler von der Firma ROM, Lothar Winkler, Bauabteilung Grünenthal; Dr. Hans-Dieter Nübler, Leiter Berufsfeuerwehr Aachen; Georg Schmidt, Leiter Vorbeugender Brandschutz von der Berufsfeuerwehr Aachen; Stefan Dohmen, Obmann Ausschuss VDI-RL 3564; Prof. Hans Joachim Gerhardt, IFI Aachen; Dr. Jürgen Wiese, Halfkann & Kirchner; Dr. Eckhardt Hagen; Dr. Mingyi Wang, VdS; Martin Kroll, Jung, Meyer & Partner; Thomas Fr. Hegger, Obmann Normenausschuss DIN 18232 sowie etwa 30 Feuerwehrleute der Berufsfeuerwehr und Freiwilligen Feuerwehr Aachen und Mitarbeiter der Werkfeuerwehr der Bayer AG, Leverkusen.

2 Rauchversuch

2.1 VERSUCHSAUFBAU

Das HRL hat eine Länge von 96 m und eine Höhe von 32 m (Bild 1). Es besteht aus einzelnen Gängen von 4,30 m Breite, die bis auf einen schmalen Raum an den Kopfseiten durch massive Stahlbetonwände voneinander abgetrennt sind. Im Abstand von 4 Europalettenbreiten sind in den Gängen Stahlbetonwangen mit angeschraubten Stahlprofilträgern eingelassen. Auf diesen Stahlprofilträgern liegen dann die Paletten mit dem Lagergut auf. Vertikal kön-

nen 20 bis 30 Fächer eingerichtet und belegt werden. In jeder Regalebene sind Wandsprinkler installiert. Zwischen den freien Enden der Wangen befindet sich ein etwa 2 m breiter Freiraum, der vom Regalbediengerät befahren wird.

Um das HRL auf einen kleineren Rauchabschnitt zu begrenzen, wurden drei nebeneinander liegende Gänge durch Folien an den Kopfseiten vom übrigen Lagerraum abgetrennt. Drei Gänge ergaben also einen Rauchabschnitt.

Die Bodenfläche pro Gang betrug 415 m², die Gesamtfläche des Rauchabschnitts damit ca. 1250 m². Jeder Gang hat ein Raumvolumen von ca. 13000 m³, der Rauchabschnitt ein Volumen von ca. 40000 m³.

Zur Erzeugung des Rauchs stellte die Firma ROM aus Hamburg einen Rauchgenerator zur Verfügung. Es handelte sich um einen mit Propangas beheizten Heißlüfter, in den über vier handelsübliche Nebelmaschinen Diskonebel eingeblasen wurde. Er generierte einen Warmluftstrahl von ca. 5000 m³/h und setzte 300 bis 400 m³/h Rauch frei.

Da an der Austrittsstelle des Rauchgenerators in der Spitze kurzzeitig Temperaturen von bis zu 120 °C erzeugt werden können und damit theoretisch die Gefahr bestand, dass ein Sprinklerkopf des Wandsprinklers ausgelöst worden wäre, untersagte die Firma Grünenthal vorsorglich den Betrieb des Rauchgenerators in der Regalebene. Das Gerät wurde deshalb im Gang positioniert und der Thermik- bzw. Kaltluftstrom zur Decke ausgerichtet.

2.2 VERSUCHSPARAMETER

In drei Versuchsabläufen wird die Entrauchung des HRL unter verschiedenen Bedingungen simuliert.

Feste Parameter sind in allen drei Abläufen

- die Rauchbefüllung mit einer Dauer von 20 Minuten,
- die Größe der Zuluftöffnungen an den Kopfseiten des HRL in etwa 2 m Höhe. Die Zuluft strömt durch vier Türen und drei Jalousien über den Türen. Die gesamte Öffnungsfläche der Zuluft beträgt

$$A_{g,zu} = 12 \text{ m}^2$$

$$A_{w,zu} = 0,7 \times 12 = 8,1 \text{ m}^2$$

mit $A_{g,zu}$: geometrisch freie Fläche der Zuluft,

$A_{w,zu}$: aerodynamisch wirksame Fläche der Zuluft.

Variierender Parameter ist die Größe der Rauchabzugsfläche. Im HRL bilden Öffnungen im Dach natürliche Rauchabzüge (NRA). Je nachdem, wie viele NRA geöffnet sind und/oder je nach Öffnungswinkel der NRA (Lüftungsstellung oder NRA-Stellung), ändert sich das Verhältnis der aerodynamisch wirksamen Rauchabzugsfläche A_w zur Grundfläche des Rauchabschnitts und damit auch der durch den Entwurf der VDI-RL 3564 zur Diskussion stehende prozentuale Anteil von A_w .

Da Einsatzkräfte der Feuerwehr bei der Brandbekämpfung fallweise auch so genannte Hochdrucklüfter einsetzen, um die Entrauchung des Brandortes zu beschleunigen, werden außerdem im zweiten Versuchablauf solche Hochleistungslüfter zugeschaltet.

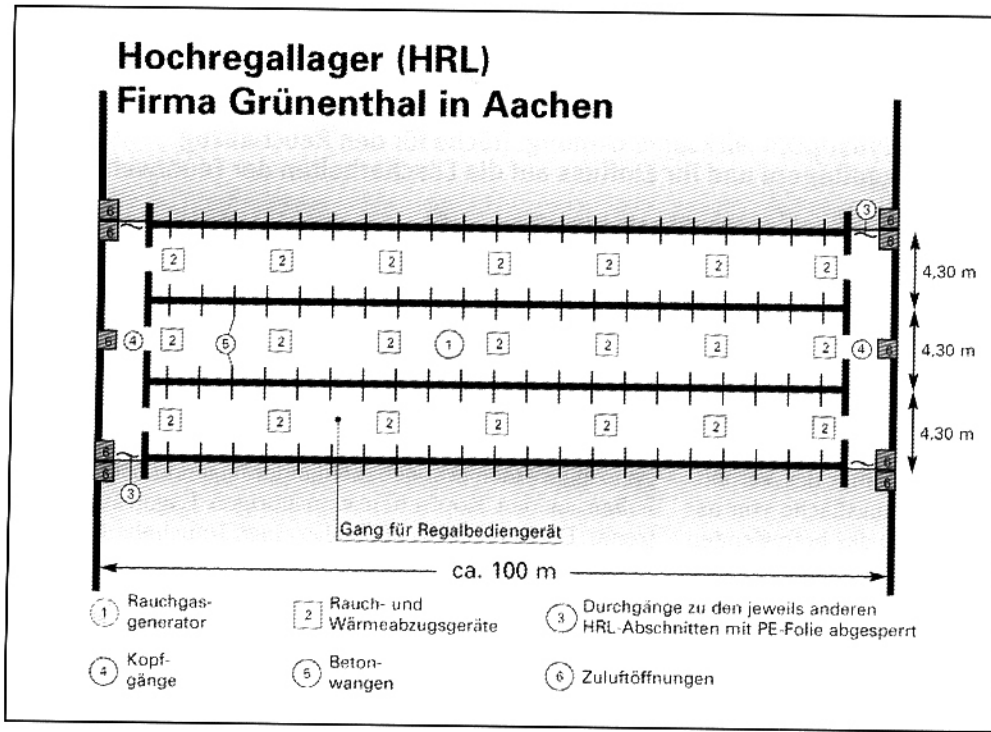


BILD 1
Hochregallager der Firma
Grüenthal, Aachen.

Die NRA und Zuluftöffnungen werden nach der Rauchbefüllung jeweils geöffnet. Außerhalb und innerhalb des HRL stehende Versuchsteilnehmer beobachten die Ent Rauchung und beurteilen die Sichtverhältnisse im HRL.

In der folgenden Beschreibung der Versuchsabläufe werden jeweils die Parametervariationen und die Beobachtungen während der etwa 20-minütigen Versuchszeit angegeben.

2.3 VERSUCH 1

Parameter

- Öffnung von einem NRA pro Gang an der Kopfseite.
 $A_w = 2,25 \text{ m}^2$, entsprechend ca. 0,5 % der Grundfläche.
- Flächenverhältnis Zuluft zu Abluft: 1,2:1.

Beobachtungen

- Die horizontale Sichtweite im Bereich bis 10 m Höhe beträgt zuerst mehr als 50 m und nimmt langsam ab. Die Rauchsichtdicke unter der Decke wird auf 5 m bis 8 m geschätzt. Der Rauch tritt aus den drei geöffneten NRA des vom simulierten Brand betroffenen Gangs aus.
- Verrauchung im Bodenbereich nicht unter 20 m. Fallende Rauchsleier an den Kopfseiten. Durch schlechte künstliche Beleuchtung (die NRA sind Dunkelklappen, Leuchtröhren befinden sich nur an den Stirnseiten und unter den unteren Regalträgerprofilen) und die ungünstige Geometrie des HRL konnten die Sichtverhältnisse in Höhen über 10 m nicht beurteilt werden. Die Decke und die oberen Regaletagen waren nicht erkennbar, von den geöffneten NRA war kein Tageslichtschimmer wahrnehmbar.

2.4 VERSUCH 2

Parameter

- Während der Rauchbefüllung bleibt in den ersten 5 bis 7 Minuten die Heizung des Rauchgenerators ausgeschaltet, sodass der Rauchstrahl weniger gerichtet nach oben steigt.
- Öffnung von einem NRA pro Gang an der Kopfseite.
 $A_w = 2,25 \text{ m}^2$, entsprechend ca. 0,5 % der Grundfläche.

- Flächenverhältnis Zuluft zu Abluft: 1,2:1.
- Zusätzliche Zuluft durch drei transportable Hochleistungslüfter (Tempest 274) mit einer Leistung von jeweils $40800 \text{ m}^3/\text{h}$ und vier Hochleistungslüfter (Tempest 217) mit einer Leistung von jeweils ca. $30000 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Hochleistungslüfter der Feuerwehr mit einer Gesamtleistung von ca. $250000 \text{ m}^3/\text{h}$ werden vor die Türöffnungen des HRL gestellt.

Beobachtungen

- Die horizontale Sichtweite im Bereich bis 10 m Höhe beträgt zuerst mehr als 50 m, die durch spätere Verwirbelung jedoch abnimmt. Die Rauchsichtdicke wird auf 8 m bis 12 m geschätzt. Der Rauch tritt in deutlich größerer Menge als in Versuch 1 aus den drei geöffneten NRA aus.
- Es kommt zu einer sichtbaren Verwirbelung des Rauchs und damit zu einer Sichtverschlechterung im HRL, insbesondere auch im vorher raucharmen Bodenbereich. Die Ursache der Turbulenzen liegt im Betrieb der Hochleistungslüfter, vermutlich auch in der Platzierung der Zuluftöffnungen in 2 m Höhe. Die Verwirbelung hat hier keine negativen Auswirkungen, weil in einem HRL meist keine Personenrettung erforderlich wird.
- Es kann ein deutlich schnellerer Rauchabzug als in Versuch 1 festgestellt werden.

2.5 VERSUCH 3

Parameter

- Öffnung von sieben NRA im Dach über dem mittleren Gang.
 $A_w = 22 \text{ m}^2$, entsprechend ca. 5 % der Grundfläche.
- Flächenverhältnis Zuluft zu Abluft: 0,37:1.

Beobachtungen

- Die horizontale Sichtweite im Bereich bis 10 m Höhe beträgt zuerst mehr als 50 m, die sich später jedoch wesentlich verschlechtert. Die Rauchsichtdicke wird auf 5 m bis 8 m geschätzt.



BILD 2 Blick in das Hochregallager während eines Rauchversuchs.

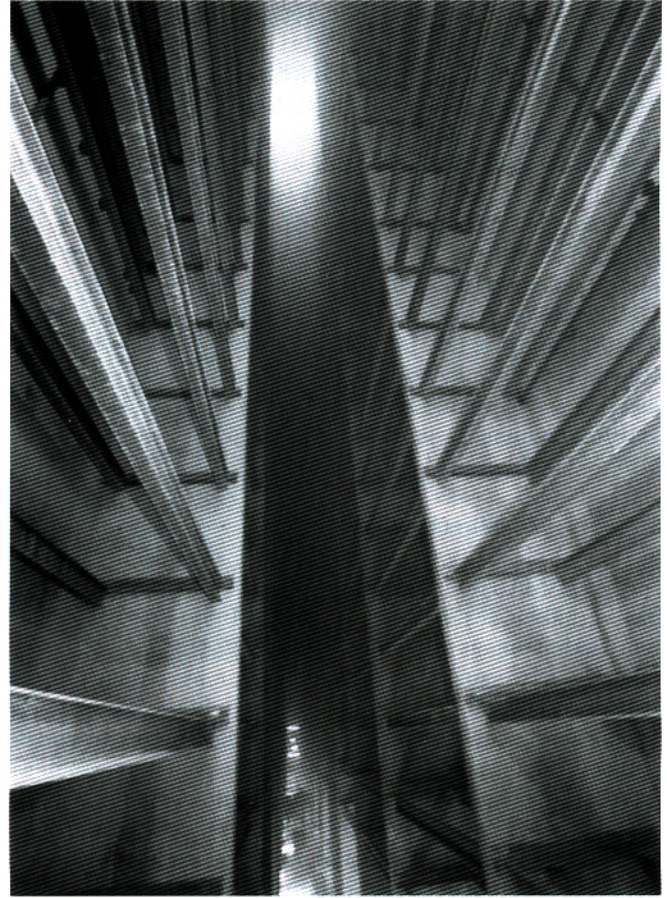


BILD 3 Blick in das Hochregallager vor den Rauchversuchen.

- Nach Öffnung der NRA verbesserte sich die Sicht umgehend, man erkannte komplett die oberen Regaletagen und die Dachuntersicht.
- Beobachter auf dem Dach stellen im Vergleich zu Versuch 2 einen deutlich schwächeren Rauchabzug – jedoch auf einer größeren Fläche – fest.

2.6 DISKUSSION DER VERSUCHSBEDINGUNGEN

Die gewählte Anordnung des Rauchgenerators simuliert einen Rauchvolumenstrom, der an der untersten Grenze eines möglichen realen Brandes des Regalbedienegeräts liegt (siehe hierzu auch die Brandversuche der MFPA Leipzig, veröffentlicht bei VDMA, Seminare Brandschutz 6. März 2001, Frankfurt).

Auch konnten die Versuche die Frage nach der Rauchausbreitung und dem daraus resultierenden Rauchvolumen bei einem Brand in einem durch Palettenplätze gedeckelten Regalplatz in keinsten Weise beantworten, da hier mit einem wesentlich geringeren Rauchauftrieb (vertikal) und einer wesentlich größeren Rauchausbreitung (horizontal) gerechnet werden muss.

Die Gänge bilden lange, enge und hohe Räume, die durch Seitenwände aus Stahlbeton rauchdicht abgeschlossen sind. Diese Raumgeometrie begrenzt daher die Rauchausbreitung in einer außergewöhnlich vorteilhaften Weise fast ausschließlich auf die brandbelasteten Gangbereiche, zumal der zusätzlich wirkende physikalische Kamineffekt einen schnelleren Abzug des Rauches nach oben begünstigt. Somit kann sich der Rauch in diesem Gebäude horizontal nur geringfügig ausbreiten, während in offenen

HRL (keine rauchdichte Abtrennung zwischen den Gängen) eine Rauchausbreitung in andere Gänge unausweichlich ist. Deshalb sind diese Versuchsergebnisse auf die Rauchausbreitung in anderen Raumformen, zum Beispiel rauchoffenen Regalsystemen, nicht übertragbar.

Da die vom Rauchgenerator erzeugten Rauchmengen mit einem Volumen von 300 bis 400 m³/h im Verhältnis zum Raumvolumen mit 50000 m³ sehr klein waren und überwiegend in Richtung Hallendecke geblasen wurden, kann keine verallgemeinerte Aussage über die Entrauchungszeiten in Abhängigkeit von der Größe der Rauchabzugsflächen gemacht werden. Die geringe Rauchdichte erklärt auch die in Versuch 3 festgestellte Beobachtung: Der im Vergleich zu den vorhergehenden Versuchsabläufen massivere Lichteinfall durch die sieben NRA wird subjektiv als Sichtverbesserung wahrgenommen.

2.7 DISKUSSION DER VERSUCHSERGEBNISSE

Während der Versuchsabläufe wurden nur subjektive optische Eindrücke gesammelt und keine quantitativen Messungen durchgeführt. Dieser Rauchversuch ist deshalb nur für eine qualitative Bewertung der Entrauchung des HRL geeignet (Tritt überhaupt Rauch aus den NRA aus?), nicht dagegen für eine quantitative Bewertung (Wieviel Rauch tritt in der Zeiteinheit durch die NRA aus?).

Das HRL der Firma Grünenthal war wegen der Abtrennung der Gänge durch Stahlbetonwände ein Sonderfall eines HRL. Die Rauchversuche fanden deshalb – unter dem Gesichtspunkt des schnellen Rauchabzugs – unter Idealbe-

dingungen statt. Trotzdem bildeten sich Rauchgasschichten mit einer Schichtstärke von 5 bis 12 m aus. Es ist davon auszugehen, dass die Rauchgasschichten bei realen Bränden in HRL mit offenen Regalsystemen wesentlich ausgeprägter sind.

Die Methode, die Größe der aerodynamisch wirksamen Öffnungsfläche in Abhängigkeit von der Grundfläche des Gebäudes – also mit einem Prozentsatz – zu wählen, ist falsch. Wesentliche Parameter zur Bestimmung der Öffnungsfläche sind das zu erwartende Brandgeschehen, die Gebäudehöhe sowie die Geometrie und Anordnung der Zuluftöffnungen. Die freigesetzte und damit abzuführende Rauchmenge ist nicht abhängig von der Raumfläche, in der das Feuer ausbricht. Dies wird in dem im Dezember 2001 veröffentlichten, wesentlich überarbeiteten Entwurf der DIN 18232-2 bereits berücksichtigt.

3 Modellrechnungen

Mit Hilfe von Modellrechnungen wird versucht, das Verhalten des Rauches in einem Raum unter definierten Bedingungen mathematisch zu beschreiben, sodass ohne Rauchversuche in Modellen oder im realen Objekt Aussagen über die Rauchentwicklung und die Rauchvolumenströme gemacht und entsprechende Brandschutzmaßnahmen getroffen werden können.

Allerdings sind Wärmebilanzrechnungen und auf Plume-theorien (z. B. von Tanaka, McCaffrey usw.) basierende Zonenmodelle für die Beurteilung der Rauchentwicklung, der Rauchausbreitung und der resultierenden Rauchvolumenströme im HRL nicht geeignet (VFDB, Heft 3/2001, S. 99–104). Weiterhin setzt eine solche Berechnung die Entwicklung eines Freistrahls (Plume) voraus. Im vorliegenden Fall kann sich der Plume wegen der seitlichen Begrenzung des Gangs nur zweiseitig ausbreiten. Dies führt im Vergleich zu einem Freistrahls zu einer geringeren Einmischung von Hallenluft und somit zu einem geringeren Rauchgasvolumenstrom.

Wärmebilanzrechnungen versagen auch, weil die Brand-szenarien zu unterschiedlich sind und die Wirkung der Sprinkler auf die Wärmefreisetzung nicht berechnet werden kann. Zonenmodelle gehen von der Ausbildung statischer Schichten mit verschiedenen Temperaturen aus. Im HRL wird jedoch durch Luftzufuhr von einer Seite und Rauch-/Luftgemischabfuhr auf der anderen Seite das gesamte Gasvolumen verwirbelt, sodass sich hier eben keine ausgeprägten Zonen bilden können. Die Regalanordnung verursacht zudem einen Kamineffekt, der je nach Gebäudegeometrie und Anordnung der Regale für jedes HRL anders zu bewerten ist.

Daten über die Rauchentwicklung können auch durch individuelle Modellversuche gewonnen werden. Versuche der Feuerwehr Aachen an einem Modell des HRL der Firma Grünenthal im Maßstab 1:100 haben gezeigt, dass für das HRL der Firma Grünenthal mit den seitlich rauchdicht abgeschlossenen Gängen eine aerodynamische Öffnungsfläche von mindestens 1 % vorzusehen wäre.

4 Aufgabe der Feuerwehr

Bei Brandfällen ist auch die Feuerwehr involviert. Zum Einsatz kommen entweder die zuständige Berufsfeuerwehr, die Freiwillige Feuerwehr oder eine Werkfeuerwehr. Die Berufsfeuerwehren sind in der Regel personell so aufgestellt, dass sie häufig wiederkehrende kritische

Einsätze, wie z. B. einen Zimmerbrand in einer Obergeschosswohnung, in der sich noch eine Person befindet und der erste Rettungsweg wegen der Rauchausbildung nicht mehr begehbar ist, professionell abwickeln, d. h. zuerst die Person retten (Schutzziel), dann den Brand löschen. Die Konsequenzen aus den o. g. Versuchsergebnissen bringen die Feuerwehren allerdings in Konflikt mit diesem Auftrag. Denn wenn sich, wie in diesen Rauchversuchen beobachtet, im oberen Raumvolumen eine starke massive Rauchschicht ausbildet, muss mit einem längeren Feuerwehreinsatz gerechnet werden.

Die Einsatzkräfte sind nämlich grundsätzlich verpflichtet, sich Gewissheit darüber zu verschaffen, dass keine weiteren Brandnester oder andere Gefahrenherde bestehen bevor sie abrücken. In einem HRL mit 32 m Höhe ist die Feuerwehr jedoch nicht mehr in der Lage, mit eigenen Einsatzmitteln einen Brandherd im oberen Raumvolumen bei dichtem Rauch zu finden und zu erreichen. Eine ausreichende Sicht bis zur Decke ist deshalb unabdingbar, um eine Entscheidung über das Abschalten der Sprinkleranlage bzw. Nachlöscharbeiten oder die Anweisung zum Abrücken der Einsatzkräfte treffen zu können. Die Feuerwehr hat aus diesem Grund ein starkes Interesse daran, dass das HRL innerhalb weniger Stunden auch bis zum Deckenbereich raucharm ist.

Nach Prof. Gerhardt dauert es bei einer Öffnungsfläche von 0,5 % in diesem HRL mindestens 55 Stunden, bis sich im Brandfall mit Sprinklereinsatz das Rauch-/Wasserdampfgemisch so weit verflüchtigt hat, dass die Sichtverhältnisse für die Feuerwehr ausreichen. Diese Rechnung basiert auf einer Ausströmgeschwindigkeit von 3 m/s und einer erforderlichen Verdünnung der Brandgase um den Faktor 100. Beide Angaben sind als eher günstig zu betrachten, sodass durchaus mit längeren Zeiten zu rechnen ist. Bei Einsatz der Hochleistungslüfter reduziert sich diese Zeit theoretisch auf 16 Stunden. Bei natürlicher Rauchableitung ist die Entrauchungszeit bei ausreichender Zuluftfläche etwa proportional der NRA-Fläche.

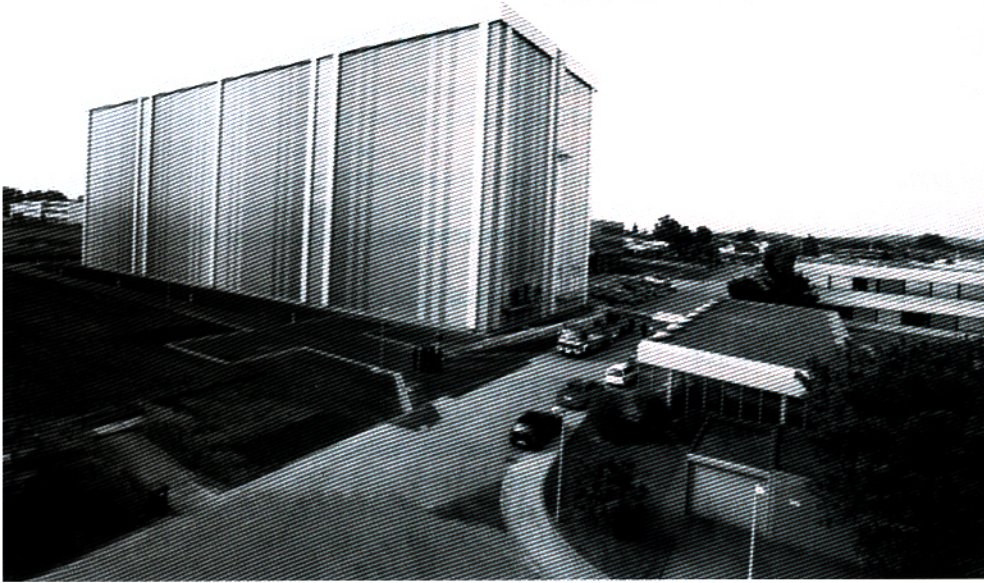
Die Feuerwehren, die nicht über Hochleistungslüfter verfügen, wären gezwungen, Einsatzkräfte an diesem HRL für einige Tage am Brandort vorzuhalten. In Bezug auf die Berufsfeuerwehr kann dies bedeuten, dass gleichzeitig Einsätze im Sinne des o. g. Schutzzieles »Personenrettung« nicht mit der gleichen Qualität bedient werden können. Ein alternativer Einsatz der Freiwilligen Feuerwehr über einen längeren Zeitraum führt nicht selten zu Problemen mit Arbeitgebern. Zudem würden die hierdurch entstehenden zusätzlichen Kosten zu Lasten der Gemeinde gehen, weil den Arbeitgebern durch die einsatzbedingte Abwesenheit der freiwilligen Helfer entstehende Ausfallkosten von der Gemeinde ersetzt werden müssen. Es ist aber nicht einzusehen, warum zu Lasten der Allgemeinheit Mehrkosten entstehen, wenn vom Betreiber zu bezahlende technische Lösungen zur Minimierung der Kosten für die Allgemeinheit führen können.

Bei einer Öffnungsfläche von z. B. 5 % dauert es, bei natürlicher Rauchableitung und entsprechend vergrößert Zuluftfläche zwar immer noch etwa sechs Stunden, bis das Raumvolumen ausreichend raucharm ist. Aus Sicht einer Berufsfeuerwehr kann diese Zeitspanne aber akzeptiert werden.

Werkfeuerwehren sind meist nicht an eine solche zeitliche Begrenzung ihres Einsatzes gebunden. Sie könnten unter Einsatz einer Sprinkleranlage theoretisch so lange am Brandort warten, bis jede Gefahr ausgeschlossen ist. In d

BILD 4

Das Hochregallager der Grünenthal GmbH Deutschland in Aachen. Grünenthal ist Forscher der Arzneimittelhersteller und unabhängiges Familienunternehmen seit 1946.



sem Fall würde sich allerdings die Frage stellen, ob die so entstehenden kontaminierten Löschwassermengen auch ordnungsgemäß unter Einhaltung der entsprechenden Umweltgesetze – und wenn ja, zu welchen Kosten? – entsorgt werden können. Unter Umständen wäre deshalb ein HRL grundsätzlich in ein Becken zu stellen, Wasserpumpen einzusetzen und Tankwagen bereitzustellen, die das abgepumpte Löschwasser aufnehmen.

5 Schlussfolgerung

Da die Ergebnisse des Rauchversuchs im HRL der Firma Grünenthal keine quantitative Bewertung zulassen beziehungsweise wegen der besonderen Gebäudebedingungen nicht verallgemeinert werden können, sind sie auch nicht als Entscheidungsgrundlage geeignet, ob 0,5 % (Versuch 1) oder 5 % aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche der NRA für HRL im Sinne der VDI-RL 3564 erforderlich sind. Allerdings können die Ergebnisse auch nicht

als Beweis dafür herhalten, die Öffnungsflächen wie vorgeschlagen von 3 % auf 0,5 % zu reduzieren.

Hingegen bestätigen die Rauchversuche die auch an anderen Objekten gemachte Erfahrung, dass sich auch im HRL bei einem Brand eine starke Rauchsicht bis zum Auslösen der Sprinkler im oberen Raumvolumen bis zur Decke ausbildet und die Sicht auch auf mittleren Regaletagen versperrt. Eine ungehinderte Sicht bis zur Decke ist jedoch unerlässlich, damit die Feuerwehr eine Entscheidung über das Abschalten der Sprinkleranlage, Nachlöscharbeiten oder die Anweisung zum Abrücken der Einsatzkräfte treffen kann. Nach Auslösung der Sprinkleranlage verrauchen auch die unteren Raumbereiche massiv, da die Rauchtröpfchen die Rauchgase verwirbeln.

Um das erforderliche raucharme Raumvolumen in allen Bereichen des HRL innerhalb eines angemessenen Zeitrahmens zu erzielen, reicht selbst unter idealen Voraussetzungen dieser Versuche eine aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche von 0,5 % keineswegs aus.